

Lasse Varimo

Rakenteiden mittaus optisella kuitutekniikalla

Insinöörityö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikan ja liikenteen ala
Rakennustekniikan koulutusohjelma
21.3.2007



**Kajaanin
ammattikorkeakoulu**

OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma
Tekijä Lasse Varimo	
Työn nimi Rakenteiden mittaus optisella kuitutekniikalla	
Vaihtoehtoiset ammattipinnot	Ohjaaja Matti Tiainen
	Toimeksiantaja Reiniko Oy Hannu Reinikoski
Aika Kevät 2007	Sivumäärä ja liitteet 53
<p>Tiivistelmä</p> <p>Rakennuksen käyttöikä on yleensä yli 50 vuotta, jonka varrelle mahtuu monenlaista korjausta, parannusta sekä muutosta, jotka ovat osaltaan aiheutuneet jonkinlaisen vuodon tai muun yllättävän vaurion takia. Näiden vaurioiden ja vuotojen havainnointi ennakkoon on lähes mahdotonta, ja ne ilmaantuvat tietoomme vasta siinä vaiheessa, kun vaurio on tehnyt vahinkoa rakenteille ja se on havaittavissa.</p> <p>Vaurioiden ennakointi on tutkimusten mukaan mahdollista toteuttaa optisilla kuituantureilla, joissa valon siroutumisen avulla voidaan määrittää vaurio kohta sekä mahdollinen vaurion aiheuttaja. Kuituantureita on testattu pienissä määrin suurissa hankkeissa, mutta rakennusteollisuudessa niitä ei ole vielä testattu.</p> <p>Tämän insinööryön tarkoituksena on koota kirjallisuuslähteissä ilmenevät optisen kuidun mittaukseen liittyvät tutkimukset ja tiedot yhdeksi kokonaisuudeksi, jonka pohjalta voidaan aloittaa kuituantureiden testaus laboratorio-olosuhteissa. Rakennesiossa käsitellään teoriapohjaisesti kuidun asentamiskohteita ja -pintoja, joiden avulla saadaan tarvittavat mittatiedot. Työ on tehty täysin tutkimuksien sekä teorioiden pohjalta, jonka takia esiteltäviä asioita on testattava eri kohteissa ennen niiden asennuspaikan varmistamista.</p> <p>Työn tuloksena syntyi kokonaisvaltainen tutkimus, jossa on erikseen käsitelty kuidun toimintaperiaate sekä sen mahdollistamat käyttökohteet. Työn pohjalta on helppo jatkaa tutkimus- ja kehitystyötä asian tiimoilta. Työn tarkoituksena on saada optinen kuitu tulevaisuudessa hallitsevaksi rakenteiden valvontajärjestelmäksi, jonka avulla helpotetaan asumista ja kiinteistön ylläpitämistä. Samalla mittausjärjestelmä on tukena vakuutusyhtiöille vaurioiden määrittämisen kannalta.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Kuituoptiikka, optiset sensorit, rakenteiden mittaus
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Construction Engineering
Author Lasse Varimo	
Title Structural Monitoring by Fiber Optic Sensors	
Optional Professional Studies	Instructor Matti Tiainen
	Commissioned by Reiniko Oy Hannu Reinikoski
Date Spring 2007	Total Number of Pages and Appendices 53
<p>The life cycle of buildings is normally over 50 years. This life cycle contains many kinds of improvements and modifications which are mostly caused by leakages and other damages. An observation of these damages is almost impossible. That is why maintenance units and the owners of these buildings are very enthusiastic about new kinds of solutions in this area.</p> <p>Damages can be observed by optical fiber sensors where the dispersion of the light shows where the damage is located and what causes it. The optical sensor system reacts pressure changes which are the consequence of the temperature change in the measuring sensor. This causes the dispersion of the light.</p> <p>The idea of this Bachelor's thesis was to collect all literature and test results connected with measuring by fiber optical sensors. With this information a company can start testing the fiber optical measuring system in a laboratory environment. The thesis contains the construction phase and an installation theory of fiber optic sensors.</p> <p>The thesis is a comprehensive packet where the theory of optical fiber and possible application areas in construction industry are considered in separate phases. That is why it is easy to continue the research of these products. The main purpose was to develop a measurement product that can be used in every building where the fiber optic sensor is installed.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	Fiber optics, Optical sensors, Structural measurement
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input checked="" type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

ALKUSANAT

Eräänä syksyisenä viikonloppuiltana 2006 minulta kysyttiin tietojani betoniteollisuuden eri laadunvarmennusjärjestelmistä. Jouduin tuolloin vastaamaan kysymykseen kieltävästi korostaen sitä, että en ole edes ajatellut, millä tavoin betoniteollisuus valvoo tuotantoaan. Tästä saimmekin kysymyksen esittäjän, Hannu Reinikosken, kanssa idean mahdollisesta optisesta anturijärjestelmästä, jolla voitaisiin mitata rakenteiden kuntoa sekä esimerkiksi betoniteollisuuden tuotteiden laatua. Tuolloin idea tuntui aika isotöiseltä ja utopistiselta, ainakin omasta mielestäni. Meidän koulutusohjelmamme ei sisällä valokuidun teorioita, eivätkä ne olleet tulleet minua koskaan vastaan, joten sen seurauksena opettelini aluksi optisten kuitujen teoriaa.

Työni tilaajana oli kajaanilainen optisen kuitutekniikan asiantuntijayritys Reiniko Oy ja vastuuhenkilönä sieltä toimitusjohtaja Hannu Reinikoski. Haluankin kiittää Hannua uuden ja ehkäpä mullistavan idean ohjaamisesta minun mietittäväkseni ja toteutettavaksi. Tällaisia uusia ideoita eri teollisuuden alat tarvitsevat.

Lisäksi haluan kiittää Kajaanin ammattikorkeakoulusta Matti Tiaista, joka toimi työni valvojana ja joutui näin ollen kestäämään minun omituisia ajatuksiani työtä kohden. Uskonkin, että lopulta Matti sai työstä itselleen lisätietoa uusista ratkaisuista, joista emme ole edes osanneet haaveilla.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 VALON FYSIKAALISET PERIAATTEET	3
2.1 Sähkömagneettinen spektri	3
2.2 Geometrinen optiikka	4
2.2.1 Valon heijastuminen	6
2.2.2 Valon taittuminen	6
2.2.3 Valon kokonaisheijastuminen	8
3 VALON HEIJASTUMINEN OPTISESSA KUIDUSSA	9
3.1 Optisen kuidun toimintaperiaate	9
3.2 Rayleighin sironta	10
3.3 Raman sironta	11
3.4 Optiset kuitutyypit	12
4 MITTA-ANTURITEKNIikka	14
4.1 Anturitekniikan perusteet	14
4.2 Braggin heijastuma	14
4.3 Hajautettu lämpötilan mitta	17
5 RAKENTEIDEN MITTAUS	20
5.1 Yleistä mittauksesta	20
5.2 Mittaustoiminto	20
5.3 Lämpötilan mitta	21
5.3.1 Vaurioiden havainnointi	22
5.3.2 Kosteuden mitta lämpötilan avulla	23
5.4 Betonin suhteellisen kosteuden mitta	24
5.5 Kuidun puhallus suojaputkeen	26
5.6 Mitattavat suureet	27
5.7 Mittauskohteet	28
5.7.1 Välipohjarakenteet	28
5.7.2 Seinärakenteet	31
5.7.3 Anturat ja sokkelit	34
5.7.4 Riskirakenteet	35

5.7.5 Allasrakenteet	36
5.7.6 Putket ja viemärit	38
5.7.7 Betonielementtiteollisuus	40
5.8 Mitta-antureiden liittäminen	40
6 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY	42
6.1 Mittaus Sensa Solutionsin ohjelmien avulla	42
6.1.1 Profile Data	42
6.1.2 Zone Data	43
6.1.3 Alarm Data	44
6.2 Data2View-mallinnusohjelma	44
7 JATKOSUUNNITELMAT	46
7.1 Ensimmäinen vaihe	46
7.2 Toinen vaihe	47
7.3 Tuotekehitys	48
8 YHTEENVETO	49
LÄHTEET	51

1 JOHDANTO

Tämä insinöörityö on tehty kajaanilaisen optisen kuidun asiantuntijayrityksen, Reiniko Oy:n, tilaamana. Työssä selvitetään kirjallisuuslähteiden sekä tutkimusraporttien avulla kuituoptisen mittaajärjestelmän toimivuutta betonirakenteissa. Samalla olen pyrkinyt esittämään teoriassa valokuidun toimintaa mahdollisimman yksinkertaisesti. Periaatteena voikin sanoa, että ennen kuidun jatkokehittämistä ja uusien sovellusten keksimistä on tunnettava itse kuidun toiminta ja mahdollisuudet.

Optista kuitua on kokeiltu aikaisemmin käytännössä siltojen kansirakenteiden sekä patorakenteiden mittauksissa. Kiinteistöissä tätä mittaustekniikka ei kuitenkaan ole vielä sovellettu.

Tutkimuksessani olen lähtenyt siitä periaatteesta, että kuidulla on pystyttävä mittaamaan betonin suhteellinen kosteus, jotta sen käyttö kiinteistöissä olisi optimaalista ajatellen koko elinkaarta. Tällöin betonirakenteiden kuntoa voitaisiin seurata jatkuvasti ja näin ollen vauriot ja muutokset olisi helppo havaita. Useiden tutkimusraporttien mukaan optisilla antureilla voidaan mitata suhteellisen kosteuden muutoksia betonissa. Tuolloin on kuitenkin oltava erityisen tarkka mittauksen suhteen ja mittalaite on saatava mittaamaan tiettyä valon siroutumaa. Lisäksi mittalaite on kalibroitava mittausta varten. Itse tutkimusraportit eivät esitä suoranaista rakenteen mittausta kiinteistöissä vaan mittaustutkimukset on toteutettu laboratorio-olosuhteissa jonkin betonikappaleen avulla. Kuitenkin tutkimustulosten pohjalta voidaan sanoa mittauksen olevan mahdollista. Näin ollen suhteellisen kosteuden mittaus vaatii jatkotutkimuksia ja todellisia rakenteita sekä testauskohteita mittausta ja tutkimusta varten.

Tarkkojen mittaustulosten puuttuminen työstäni johtuu mittalaitteen hankalasta saannista ja korkeasta hinnasta. Reiniko Oy on ostamassa laitteen itselleen, jotta voimme tehdä tarkempia tutkimuksia anturikaapelin asennuksesta betonirakenteisiin sekä mittaustuloksista. Tällaisia toimenpiteitä ei voi toteuttaa ilman mittalaitteita. Työni perustuukin täysin kirjalliseen materiaaliin sekä muiden henkilöiden ja yritysten tekemiin tutkimuksiin. Näiden pohjalta voidaankin päätellä, että optinen kuitu on erittäin monipuolinen anturiratkaisu ja sitä voidaan näin ollen kehittää eteenpäin. Tulevaisuudessa voidaankin olettaa optisten antureiden olevan jokapäiväisessä käytössä eri rakennuksien rakenteissa. Tällöin rakennuskannan ylläpito helpottuu mittausten etäluvun takia sekä huoltokirjoihin saatavan mittaustutkimusmateriaalin avulla.

Tällaisia tulevaisuuden ideoita voidaan alkaa kehittää ensimmäisen testauskohteen käynnistymisen jälkeen, jolloin pääsemme testaamaan laitteistojen toimintaa reaalitylanteessa, sekä suunnittelemaan uusia ratkaisuja optisen kuidun ympärille.

2 VALON FYSIKAALISET PERIAATTEET

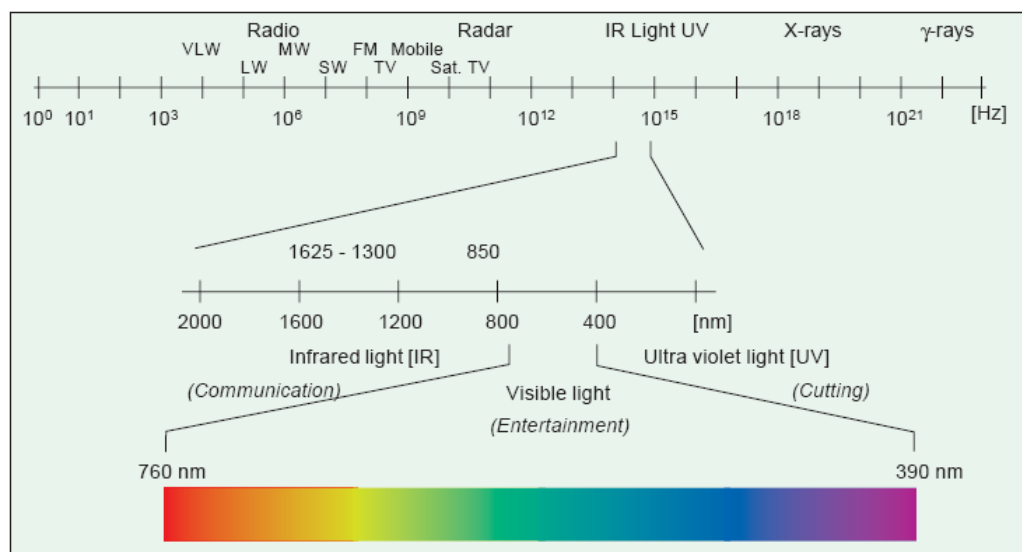
2.1 Sähkömagneettinen spektri

Selvittääksemme optisen kuidun periaatteen ja toiminnan on ensiksi tutkittava valon käyttäytymisen periaatteita niin fysikaalisesti kuin visuaalisesti. [1.]

Valo käyttäytyy monilla eri keinoilla eri tilanteissa. Kuvaillessani valon toimintaa yksinkertaisesti on siihen perehdyttävä eri keinojen avulla. Näitä ovat:

- Geometrinen optiikka
- Aalto-optiikka
- Kvantti-optiikka

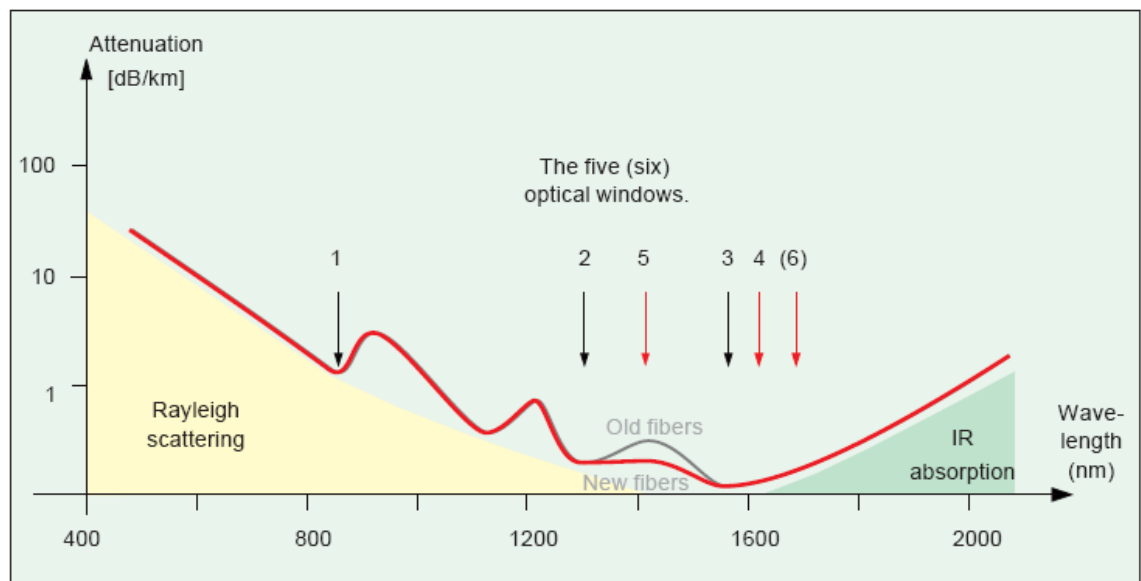
Tässä tapauksessa valoa on hyvä tutkia sähkömagneettisena säteilynä tai aaltona. Valo etenee aaltona samalla tavalla kuin radioaallot, röntgensäteet, tutka-aallot tai gammasäteet. Valo muodostaa vain pienen osan sähkömagneettisesta spektristä ja näkyvä valo sijaitseekin aallonpituusalueella 390–760 nanometriä. Valoa ajatellaankin yleisesti vain näkyvänä kirkkaana loistona, vaikka se sisältää monia muita muotoja (kuva 1). Valo voidaankin jakaa kahteen ääripäähän: infrapunaan (pitkäaaltoista) ja ultraviolettiin (lyhytaaltoista). [1.]



Kuva 1. Sähkömagneettisen säteilyn spektri [1]

Valo voidaan myös käsittää laajemmin, jolloin mukaan lasketaan linseistä, prismoista ja hiiloista säteilevä valo. Tämä laajempi käsittely sisältää valon aallonpituudet, jotka sijaitsevat 190 (UV-valo) – 2000 (Infrapuna) nm alueella [1.]

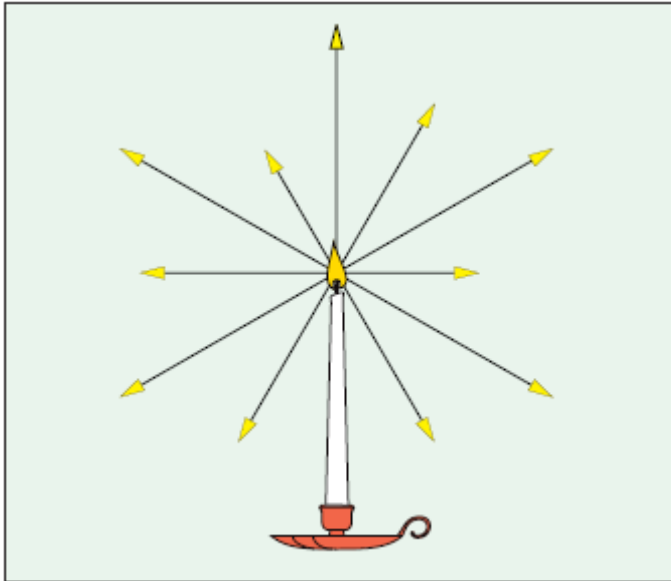
Valonläpäisevyys optisessa kuidussa voidaan jakaa viiteen eri ikkunaan, jossa jokaisessa valo vaimenee tietyn verran. Nämä vaimennuspisteet sijaitsevat aallonpituusalueella 850, 1310, 1390, 1550 ja 1610 nm (kuva 2). [1.]



Kuva 2. Optisessa kuidussa sijaitsevat valon vaimennuspisteet [1]

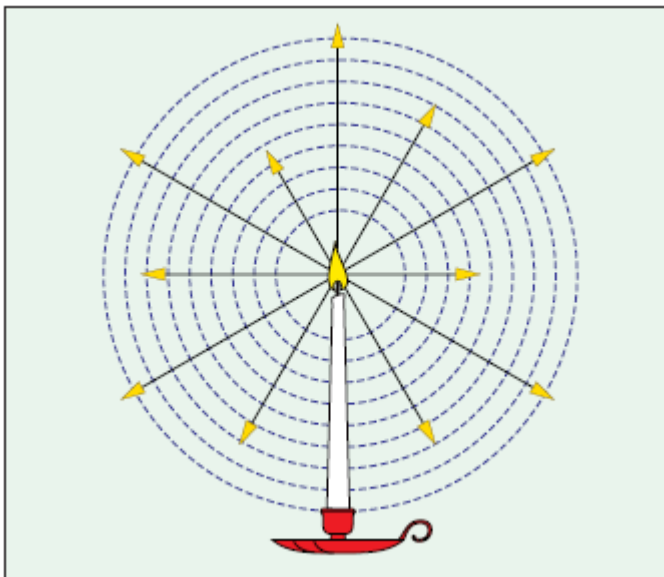
2.2 Geometrinen optiikka

Geometrisellä optiikalla on pitkä historia, joka ulottuu 2000 vuoden päähän antiikin aikaan. Tuolloin ajateltiin, että valo muodostuu suorista säteistä (kuva 3), jotka lopulta siroutuu suorista linjoista homogeenisessä ympäristössä, kuten lasissa, vedessä tai ilmassa. [1.]



Kuva 3. Valon lähteestä muodostuvat suorat säteet. [1]

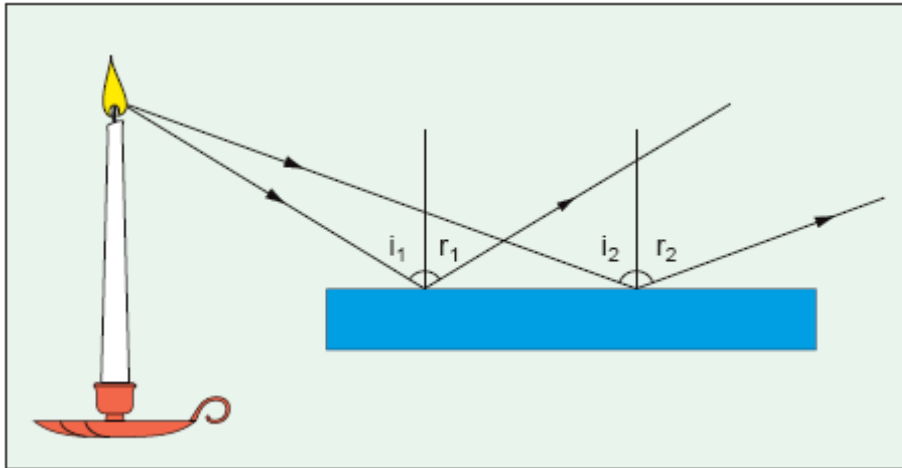
Aaltorintaman edetessä oikeassa kulmassa (kuva 4) valon voimakkuus vähenee matkan suhteessa neliöön. Osuessaan kahden eri aineen muodostamaan rajapintaan valo joko heijastuu (kuva 5), siroutuu tai taittuu (kuva 6). Heijastumisia olemme jokainen nähneet peileissä tai kirkkaissa metallilevyissä. Taittumisen voi taas kuvitella veneen airon mennessä pinnan alle. Tällöin vesi muodostaa kuvan airon taittumisesta. [1.]



Kuva 4. Valon eteneminen aaltona [1]

2.2.1 Valon heijastuminen

Valon säde, joka heijastuu jostain pinnasta, heijastuu takaisin samassa kulmassa, joka oli sen tulokulma pintaan osuessa. Tämän seurauksena voidaan matemaattisesti sanoa, että tulokulma (i) on sama kuin heijastuskulma (r). [1.]



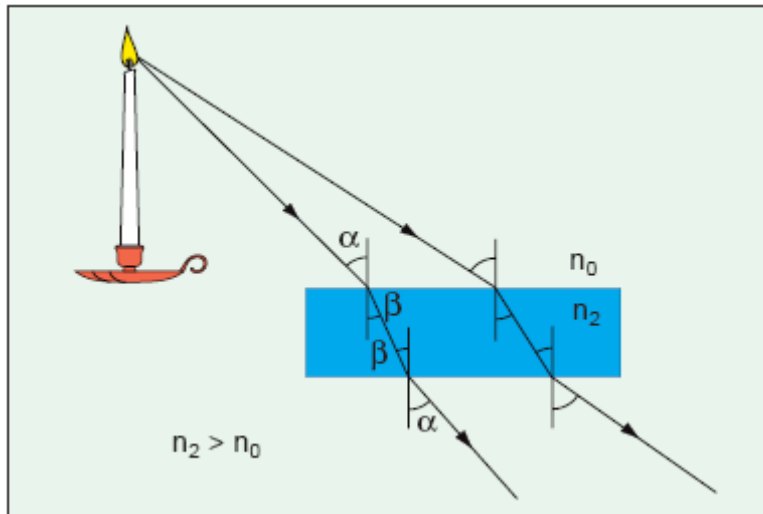
Kuva 5. Valon heijastuminen tasaisesta pinnasta [1]

2.2.2 Valon taittuminen

Taittuva valonsäde muodostaa erilaisen poistumiskulman materiaalista kuin saapuessaan materiaaliin (kuva 6). Taittumiset voidaan laskea Snellin kaavalla: (1.) [1.]

$$n_0 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (1)$$

jossa n_0 ja n_2 ovat aineen absoluuttisia taitekertoimia.



Kuva 6. Valon taittuminen eri taitekertoimen omaavista materiaalista [1]

Yleisimpiä absoluuttisia taitekertoimia (n) materiaaleille ovat:

- Ilma (tyhjiö) 1,00
- Vesi 1,33
- Silikaattilasi 1,444
- Timantti 2,417

Valon taittumisen syynä on sen hitaampi nopeus (v) tiheämmässä aineessa, josta muodostuu kaava 2.

$$v = \frac{c}{n_g} \Rightarrow n_g = \frac{c}{v} \Rightarrow n_g \geq 1, \quad (2)$$

jossa c on valonnopeus tyhjiössä. Taitekerroin (n_g) vaihtelee valon aallonpituuden (λ) mukaan (kaava 3).

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (3)$$

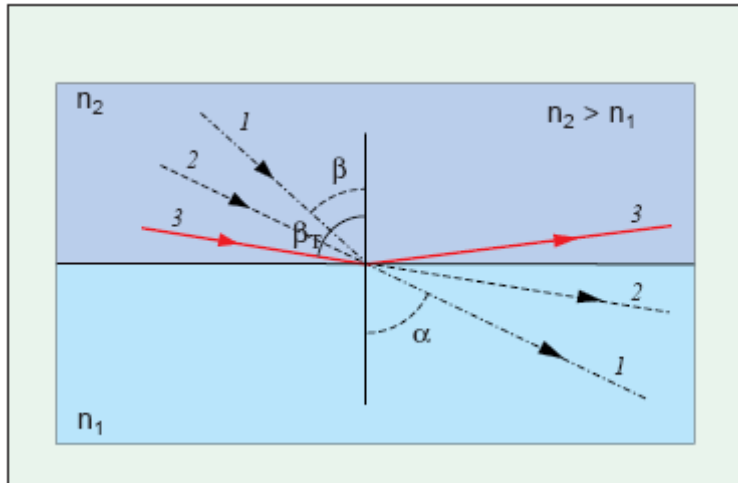
2.2.3 Valon kokonaisheijastuminen

Jos tiheämmästä materiaalista (n_2) tuleva valon säde osuu vähemmän tiheämmän materiaalin (n_1) pintaan ($n_2 > n_1$), ja sen tulokulma kohtaamistilanteessa kasvaa, voi valon taittumiskulma olla lähellä 90° . Jos tapahtuman osumiskulma nousee 90° :seen (kaava 4), voidaan tapahtumaan kutsua kokonaisheijastumiseksi (kuva 7). [1.]

$$n_2 \sin \beta = n_1 \sin 90^\circ \Rightarrow$$

$$\sin \beta = \frac{n_1}{n_2} \quad (4)$$

Kulmaa β , jossa kokonaisheijastuminen alkaa tapahtua, kutsutaan kriittiseksi kulmaksi.

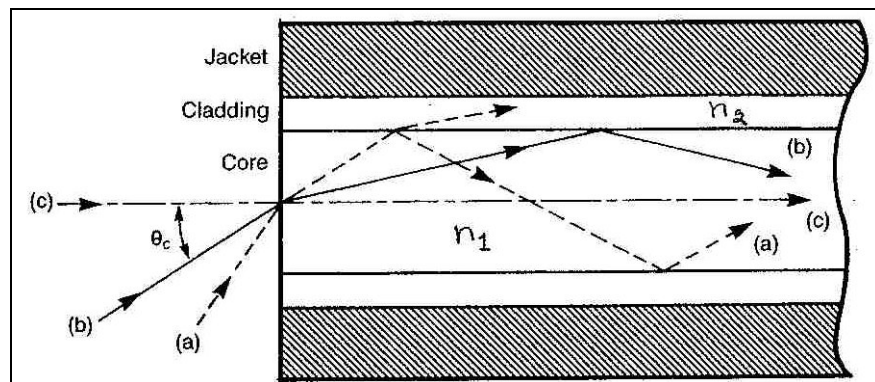


Kuva 7. Valon säteen matkatessa tiheämmästä materiaalista vähemmän tiheään ja tulo kulman ollessa yli kriittisen kohtauskulman β syntyy kokonaisheijastuminen. [1]

3 VALON HEIJASTUMINEN OPTISESSA KUIDUSSA

3.1 Optisen kuidun toimintaperiaate

Periaatteellisesti valon eteneminen optisessa kuidussa perustuu valon kokonaisheijastukseen. Optisessa kuidussa on kahta erilaista kvartsilasia, joilla molemmilla on hieman erilainen taitekerroin. Tyypillisimmät taitekertoimet ovat $n_2=1,47$ ja $n_1=1,46$, joiden ansiosta valon kokonaisheijastuksen kriittinen kulma on $83,3^\circ$ (Kuva 8.). [1.]



Kuva 8. Valon heijastuminen kuituun saapuessa sekä sen kokonaisheijastus kuidun sisällä [11]

Kuitenkin ytimeen saapuvan valon tulokulma (θ_c) ei voi ylittää tiettyä raja-arvoa, joka voidaan laskea kavalla 5.

$$\sin \theta_c < (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (5)$$

jossa n_1 on ytimen taitekerroin ja n_2 on kuoren taitekerroin. Suuretta $(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ kutsutaan kuidun numeeriseksi aukoksi (apertuuriksi), ja se merkitäänkin yleisemmin NA. Valonsäteen on tässä tapauksessa tultava kuidun sisään pienemmällä kulmalla kuin θ_c , etteivät valosäteet joudu kuoreen, jossa ne lopulta muuttuvat hyödyttömiksi. [11.]

Tarkempien tarkastelujen tuloksena on yleisesti huomattu, että vain tietyt kokonaisheijastuskulmat ovat mahdollisia ytimessä etenevälle valolle. Tämän seurauksena mahdolliset kokonaisheijastuskulmat määräävät ytimessä etenevät muodot (moodit). Kuituja voidaankin

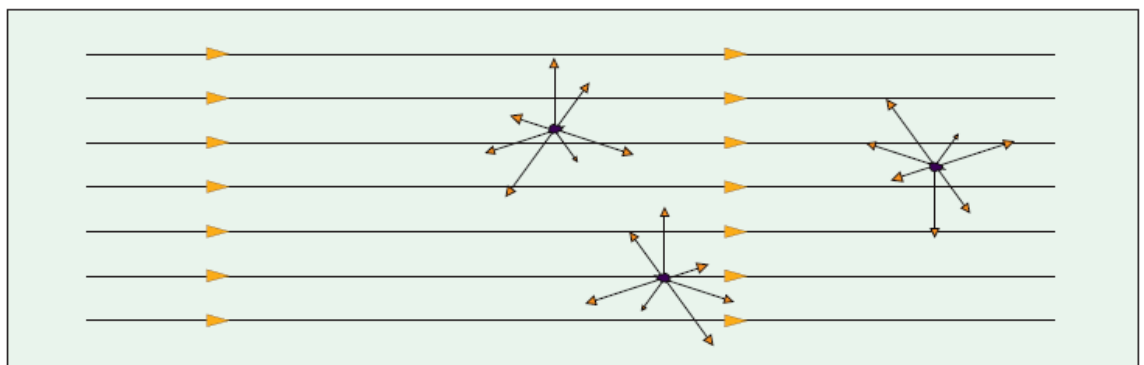
kutsua tämän takia monimuotokuiduiksi (ks. kohta 3.4). Erilaisilla kokonaisheijastuskulmilla ytimessä etenevät muodot joutuvat kulkemaan eripituisen matkan, mistä lopulta aiheutuu eroa säteiden kulkuajoissa. Tämän ilmiön ansiosta suorakaiteen muotoinen valopulssi alkaa pyöristyä reunoiltaan. Tuota kyseistä ilmiötä kutsutaan yleisemmin muotodispersion nimellä. Nopeimman ja hitaimman muodon välinen kulkuajakaero τ matkalla L voidaan laskea kaavan 6 avulla.

$$\Delta\tau = \frac{Ln_1}{C} - \frac{Ln_2}{C}, \quad (6)$$

jossa C on valon nopeus ja n on taitekerroin. Näin ollen n_1 :en ja n_2 :en välinen ero pyritään muodostamaan mahdollisimman pieneksi, mistä aiheutuu myös θ :n pieneneminen. [11.]

3.2 Rayleighin sironta

Amorfisessa aineessa, kuten lasissa, tiiviys ei ole tasalaatuista kauttaaltaan vaan se sisältää erinäisiä hypähdyksiä paikallisesti. Sama tapahtuma on myös kaasuiissa ja nesteissä. Lasi materiaalina on kuin jäykistynyttä nestettä, jonka seurauksena se ei voi olla täysin läpinäkyvää vaan siinä on aina sameita kohtia. Valon säteen matkatessa kyseisen materiaalin lävitse tapahtuu aina pientä sirontaa kaikkiin suuntiin. Tätä tapahtumaa kutsutaan Rayleighin sironnaksi, joka perustuu pienten partikkelien ja epähomogeenisyyden ilmenemiseen materiaalissa (kuva 9). Optisessa kuidussa sironnan aiheuttajia ovat hydroksiradikaalit (OH^-), metalli-ionit sekä erinäiset epäpuhtaudet. [1.]



Kuva 9. Epäpuhtauksista johtuvaa Rayleighin sirontaa valon edetessä [1]

Tästä seuraakin, että siroutuvan valon määrä (S) on suoraan suhteellinen aallonpituuteen määrään (λ) (kaava 7).

$$S \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (7)$$

Ilmakehässä sininen valo (oikeassa reunassa kuvassa 2) siroutuu noin 3 - 4 kertaa helpommin kuin punainen valo (kuvassa 2 vasemmassa reunassa). Sironnan ansiosta näkemämme taivas on sinisen värinen. Rayleighin sironnalla onkin ratkaiseva merkitys aallonpituuden kannalta valittaessa optista kuitukaapelia. Mitä pidempi on aallonpituus, sen vähemmän kuidussa tapahtuu sirontaa. Tämä taasen on huono toiminto ajatellen rakenteiden mittausta, jolloin suurella määrällä sirontaa voidaan mitata eri suureita. [1.]

Stimuloitu Brillouin sironta

Stimuloitu Brillouinin sironta (Stimulated Brillouin scattering, SBS) aiheutuu väliaineen epälineaarisuudesta, joka liittyy akustisiin fononeihin (sähkömagneettisen kentän kvantti, fotoni). Aineeseen vaikuttava fononi muuttuu ilmiössä sironneeksi fotoniksi sekä akustiseksi fononiksi. Sironneella valolla on oma aallonpituus, joka on muuttunut Brillouinin muutoksen verran. Muutoksen suuruus riippuu materiaaliyhdisteistä, valon taajuudesta sekä väliaineen lämpötilasta ja paineesta.

Brillouinin sirontaa sovelletaan erinäisissä lämpötilan ja paineen mittauksissa. [3.]

3.3 Raman sironta

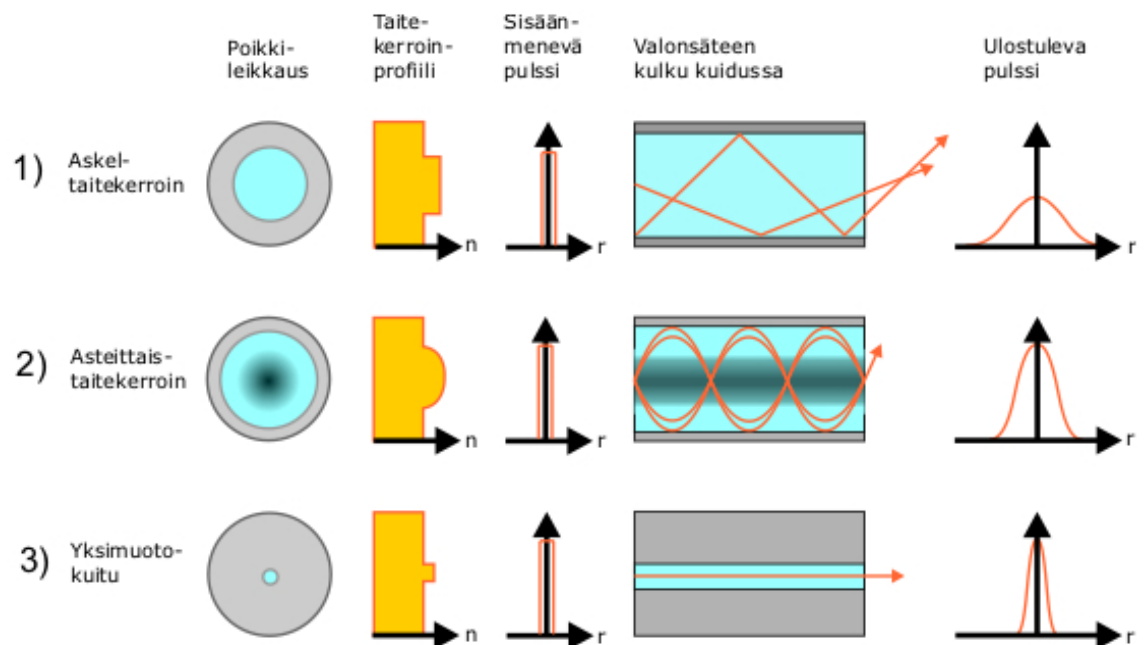
Valon hajotessa molekyylistä tai atomista useimmat fotonit hajoavat elastisesti, kuten tapahtuu Rayleighin sironnassa. Raman-sironnalla tarkoitetaan fotonin epäelastista siroamista, jonka seurauksena syntyy tai häviää edellä mainittu optinen fotoni. Tämän seurauksena myös valon taajuus muuttuu. Raman sirontaa voi esiintyä joko hallitusti eli stimuloidusti (Stimulated Raman scattering, SRS) tai spontaanisti. Raman siroutumaa voidaan hyödyntää spektroskopiassa mineraalien ja orgaanisten aineiden määrittelyyn. [3.]

3.4 Optiset kuitutyytit

Sen mukaan, millainen taiteprofiili kuidussa on ja miten valo sen perusteella etenee, kuidut jaotellaan eri tyyppisiin. Pääjako on monimuotokuidut ja yksimuotokuidut. Sekä monimuoto- että yksimuotokuituja on monta eri tyyppiä. Valon etenemisen kannalta on havainnollista esitellä kolme eri kuitutyyppiä:

- Askeltaitekertoiminen monimuotokuitu, eli askelkuitu (Step index multimode fibre)
- Asteittaistaitekertoiminen monimuotokuitu, eli asteittaiskuitu (Graded index multimode fibre)
- Yksimuotokuitu, (Singlemode fibre)

Vaikka askelkuitua ei nykyään juuri lainkaan käytetä tiedonsiirrossa, on myös sen periaate havainnollisuuden vuoksi hyvä esittää. Kuvassa 10 on esitetty kuitutyyppien periaatteet.



Kuva 10. Askelkuidun (a), asteittaiskuidun (b) ja yksimuotokuidun (c) toiminnan pääperiaatteet [19]

Askelkuidussa taitekerroin muuttuu hyppäyksellisesti ytimen ja kuoren rajapinnassa. Koska ytimen halkaisija on huomattavasti suurempi kuin käytetyn valon aallonpituus, etenee kui-

dussa monta eri muotoa, kukin eri kulmissa heijastellen. Koska valopulssin eri etenemis-komponenteilla on eripituinen matka kuljettavanaan, levenee pulssi edetessään kuidussa eli syntyy muoto- ja kulkuajadispersiota. Osa valotehosta häviää myös matkalla, eli syntyy vaimennusta. Tämä näkyy vastaanotettavan pulssin vaimenemisena.

Asteittaiskuidussa taitekerroin muuttuu ytimessä asteittaisesti kuorta kohti poikkileikkauksen säteen suunnassa. Tällöin valonsäteet kulkevat vähitellen taittuen eikä jyrkästi heijastuen kuten askelkuidussa. Myös asteittaiskuidussa valo etenee useissa eri muodoissa, kuitenkin siten, että ytimen reunoilla valon nopeus on suurempi kuin keskiosassa. Tästä johtuu, että erot eri muotojen etenemisajoissa eli muotodispersio on pienempi kuin askelkuidussa. Pitemmän matkan kulkenneet valonsäteet kulkevat nimittäin nopeammin. Vastaanotetun pulssin levenemä on pienempi kuin askelkuidussa. Myös vaimennus asteittaiskuidussa on pienempi.

Yksimuotokuidun ytimen halkaisija on niin pieni, luokkaa 9 mikrometriä, ja taitekerroinero sellainen, että käytetyllä aallonpituudella etenee vain yksi muoto. Muotodispersiota ei esiinny ollenkaan, mutta toisenlaista, kromaattista dispersiota yksimuotokuidullakin esiintyy. Kuitenkin valosignaalin siroaminen on yksimuotokuiduissa erittäin todennäköistä. Myös vaimennus johtuu, että osa valosta siroaa kuoressa.

4 MITTA-ANTURITEKNIikka

4.1 Anturitekniikan perusteet

Kuituoptisella anturilla tarkoitetaan mitattavaan kohteeseen asennettua kuitukaapelia, joka on yhteydessä mittalaitteeseen. Tämä järjestelmä havaitsee erilaisia mitattavia suureita, kuten lämpötilojen muutoksia, mekaanisten paineiden aiheuttamia muutoksia sekä kemiallisten aineiden pitoisuuksia ja erilaisia värähtelyjä. Anturin toiminta pohjautuu laserista lähtevän valon etenemiseen optisessa kuidussa, jossa siihen kohdistuu pieniä muutoksia, jonka lopulta mittalaite havaitsee. Verrattuna tavallisiin anturitekniikoihin kuituoptinen anturi antaa seuraavia etuja vertailussa: [2.]

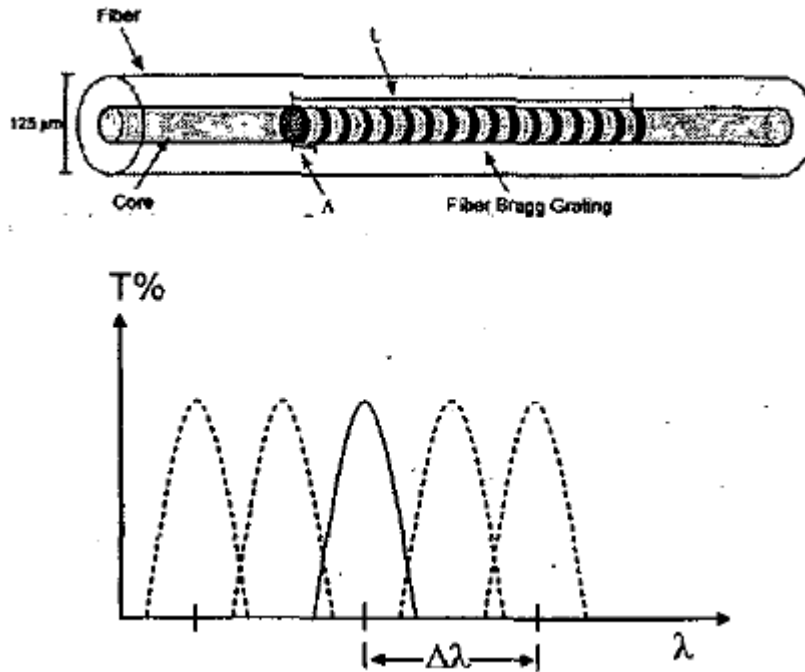
- Optiset anturit koostuvat sähköisesti eristetyistä materiaaleista, jonka vuoksi niitä voidaan käyttää korkeajännitteisillä alueilla.
- Optisen anturin materiaalit ovat kemiallisille reaktioille immuuneja, eli ne eivät ruostu.
- Optinen anturi on lähes immuuni elektromagneettiselle säteilylle (EMI).
- Optisella anturilla on suuri lämpötila-alue, jossa se voi toimia (-50 – 500 C°).
- Kuidun vaihto anturiin on helppoa ja näin ollen ne ovat pitkäikäisiä.
- Optisen kaapelin hankintahinta on alhainen..
- Yksi kaapeli vastaa tuhansia mitta-antureita.
- Optinen kuitu omaa suuren kaistanleveyden sekä ne ovat erittäin kevyitä asentaa.

4.2 Braggin heijastuma

Optinen Braggin heijastuma (Fiber Bragg grating, FBG) tarkoittaa jaksoittaista tai jaksotonta häiriötä taitekertoimessa optisen kuidun ytimessä. Yleensä häiriö on jaksottainen ja pituudeltaan noin pari millimetriä tai senttimetriä. Tämä johtaa valon heijastumiseen kapealla aallonpituusalueella. [2.]

Braggin heijastuma anturina

Useimmissa tapauksissa kuituoptiset sensorit perustuvat kuituoptiseen Braggin heijastumaan (kuva 11).



Kuva 11. Ylemmässä kuvassa esitetään Braggin hila kuidussa. Alemmassa kuvassa esitetään joko lämpötilan muutoksesta tai mekaanisesta jännitteestä syntynyttä takaisinsirontaa [4]

Tämän heijastuman aallonpituuteen (λ_B) vaikuttaa kuidun ytimen taitekerroin (n_{eff}) sekä tason heijastuman ajanjakso (Λ). Kaavassa 8 esitetään edellä mainitut tekijät laskentamuodossa. [6.]

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (8)$$

Yksinkertaisuudessaan moni kuituoptinen sensori toimii niin, että ne mittaavat Braggin heijastumassa muodostuvaa aallonpituuden muutosta ($\Delta\lambda$), joka taasen riippuu mittausparametrien kuten lämpötilan ja mekaanisen jännityksen aiheuttamasta muutoksesta. Tästä saadaan aikaiseksi kaava (kaava 9)

$$\left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda} \right] = C_S S + C_T \Delta T, \quad (9)$$

jossa λ_B on heijastunut aallonpituus, λ on lähetetty aallonpituus, S on paine/jännitys, ΔT on kappaleen lämpötila, C_S on paineen kerroin sekä C_T lämpötilan kerroin. [2] Kaavalla 9 voidaan laskea lämpötilan ja paineen muutokset mitta-anturin alueella. Toisaalta, kun mitattavasta kohteesta halutaan saada ulos suhteellisen kosteuden arvot, on tuolloin syytä käyttää laskentakaavana seuraavaa kaavaa (kaava 10). [14.]

$$\left[\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \right] = S_{FBG,RH} \Delta RH + S_{FBG,T} \Delta T, \quad (10)$$

jossa $S_{FBG,RH}$ ja $S_{FBG,T}$ ovat erikseen laskettavia kertoimia. Ne voidaan laskea seuraavasti:

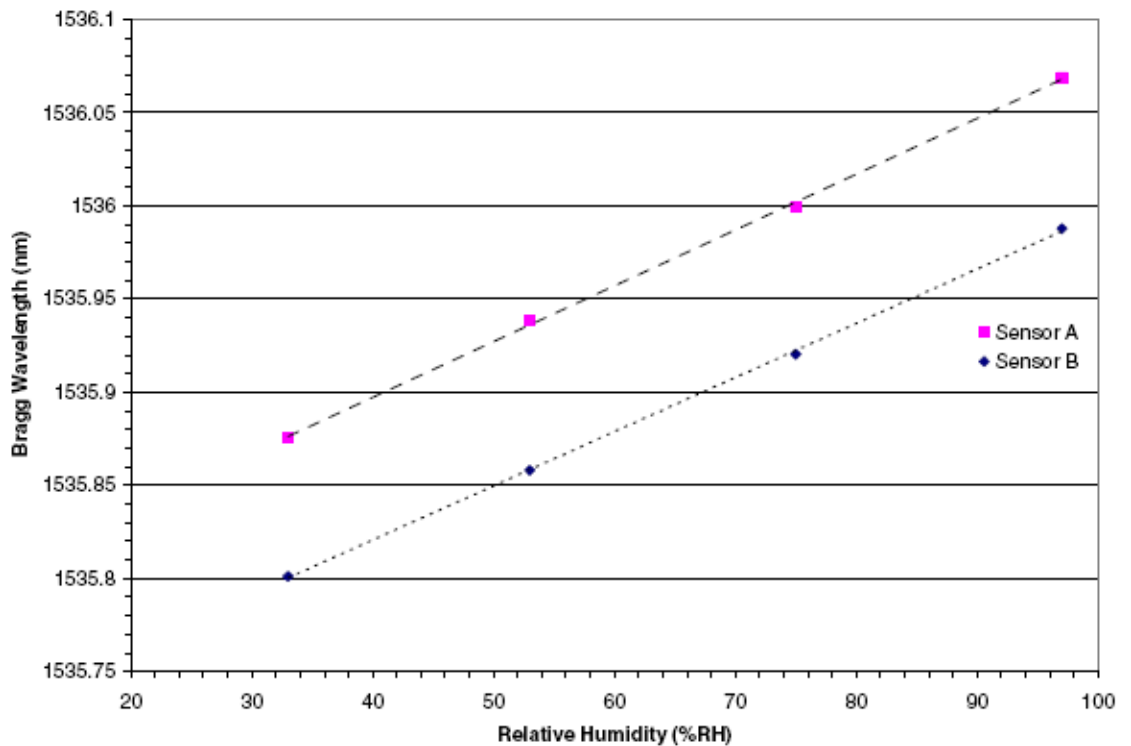
$$S_{FBG,RH} = S_{RH} = \beta_{cf} - \hat{p}_e \beta_{cf}, \quad (11)$$

jossa β_{cf} on hygroskooppinen kerroin ja \hat{p}_e on fotoelastinen kerroin.

$$S_{FBG,T} = S_T = \alpha_{cf} - \hat{p}_e (\alpha_{cf} - \alpha_f) + \xi, \quad (12)$$

jossa α_{cf} on lämpötilan kerroin ja ξ on mittausalueen optisen polun pituus. [14.]

Näiden edellä mainittujen kaavojen ansiosta Braggin heijastumaa voidaan hyödyntää esimerkiksi betonin suhteellisen kosteuden mittauksessa, kun anturikaapeli valitaan sopivaksi ja mittalaite kalibroidaan oikein. Kaapelin tulee olla polymeerillä/silikaatilla pinnoitettu, koska tuolloin polymeeri reagoi herkästi kosteuden kanssa saaden aikaan tällä tavoin painetta, joka vastaavasti ilmenee siroutumana valoalloissa. Suhteellisen kosteuden mittauksessa mittalaitteen herkkyys on noin $3,0 \times 10^{-3} \text{ nm}/\%RH$, eli yhden kosteusprosentin nousu aiheuttaa aallonpituudessa pienen muutoksen. Tämän muutoksen mittauksella saadaan selville betonin kosteus (kuva 12), sen muutos ja lisämittauksella senhetkinen lämpötila. [6.]



Kuva 12. Braggin heijastuman aallonpituuden muutos betonin suhteellisen kostuden vaikutuksesta kahden eri pisteissä olevan mittaussensorin mittaamana.. [6]

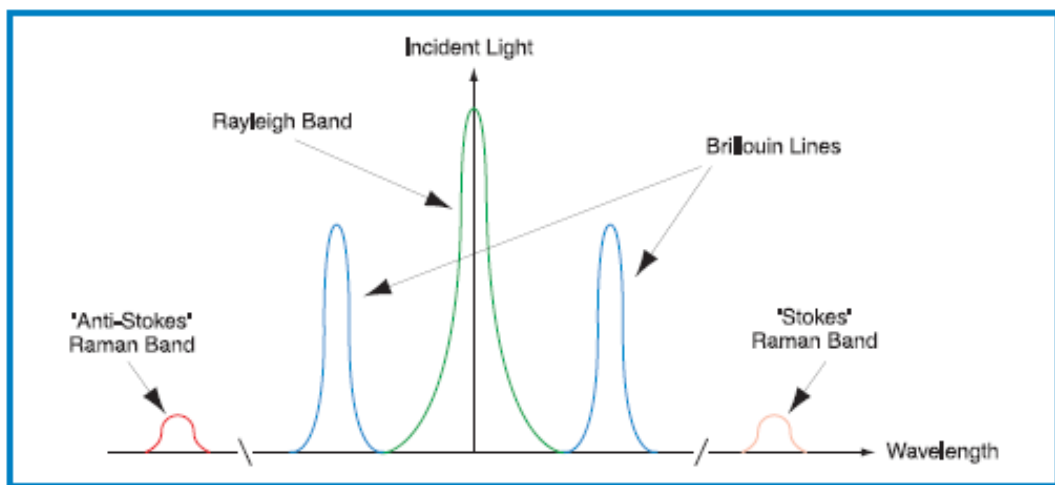
4.3 Hajautettu lämpötilan mittausta

Distributed temperature sensing, DTS, (Hajautettu lämpötilan mittausta) on optoelektroninen laite, joka mittaa optisen kuidun avulla lämpötiloja lineaarisesti. Tällöin koko kaapeli on yhtä mitta-anturia, eli yksittäisiä mitta-pisteitä voi olla jopa useita tuhansia. DTS:n mittatarkkuus on mittalaitteesta riippuvainen, mutta esimerkiksi mittalaittevalmistaja Sensa Solution antaa mittalaitteelleen mittatarkkuudeksi $\pm 0,5$ °C valon aallonpituuden ollessa tuolloin 1064 nm. Tuollaisella mittatarkkuudella voidaan mitattavaa kohdetta seurata hyvin tarkasti ja reaaliajassa. Kaapeleilla ei ole DTS:ssä merkitystä vaan optinen kaapeli voi olla jopa 30 km pitkä.

Distributed temperature sensing perustuu lämpötilan, paineen tai venymän aiheuttamaan valon vaimennukseen. Valon vaimennuksen ja sitä kautta siroutuman takia voidaan tapahtumapaikka määrittää kulkuajan perusteella, kuten lineaarisissa sensoreissa. DTS-mittausjärjestelmä perustuu valon Raman-siroutumaan (ks. kohta 3.2). Toisin kuin saapuva valo, tämä siroutunut valo käy läpi spektrisiirtymän, joka on verrannollinen resonanssitaajuudelle

hilavärähtelyssä. Optisessa kuidussa takaisin sironnut valo sisältää kolmea erilaista spektristä jakoa (kuva 13): [7.]

- Rayleighin sironta, jota lähetetty laservalo sisälsi.
- Stokes-kaistan osatekijät, joilla on suurempi aallonpituus kuin lähetetyillä fotoneilla.
- Anti-Stokes-kaistan osatekijät, joilla on pienempi aallonpituus kuin lähetetyillä fotoneilla.



Kuva 13. Takaisinsiroaman spektri [8]

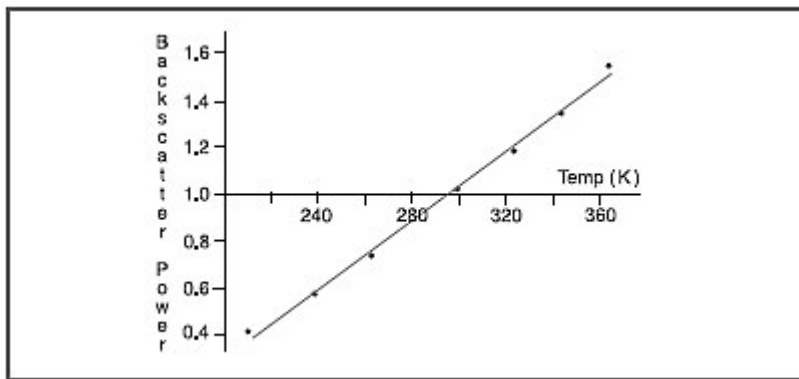
Niin kutsuttu anti-Stokes-kaista on lämpötilasta riippuva (kuva 14), kun taas Stokes-kaista on riippumattom lämpötilasta. Optisen mitta-anturin lämpötila juontaakin juurensa Stokes-kaistan ja anti-Stokes-kaistan suhteesta (kaava 13). [7.]

$$\frac{I_a}{I_s} = \frac{(\bar{\gamma}_0 + \bar{\gamma}_k)^4}{(\bar{\gamma}_0 - \bar{\gamma}_k)^4} \exp\left(\frac{-hc\bar{\gamma}_k}{KT}\right), \quad (13)$$

jossa:

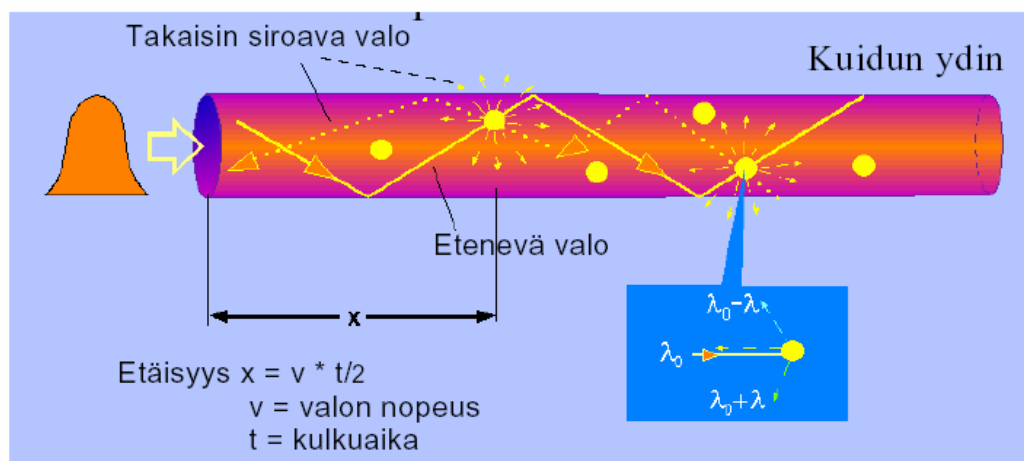
- I_a : anti-Stokes-kaistan intensiteetti
- I_s : Stokes-kaistan intensiteetti
- $\bar{\gamma}_0$: takaisin siroutuneiden valoaaltojen määrä
- $\bar{\gamma}_k$: valoaaltojen siirtymän määrä

- T : lämpötila (K)
- K : Boltzmanin vakio ($1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)
- h : Planckin vakio ($6,626076 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$)
- c : valon nopeus



Kuva 14. Anti-Stoke- takaisinsirouman voimakkuuden muuttuminen lämpötilan mukaan [8]

Kohteessa tapahtuneen lämpötilan muutoksen paikka voidaan määrittellä tarkasti valon takaisin kulkuajan sekä valon nopeuden avulla (kuva 15).



Kuva 15. Tapahtumapaikan etäisyyden määrittäminen [12]

5 RAKENTEIDEN MITTAUS

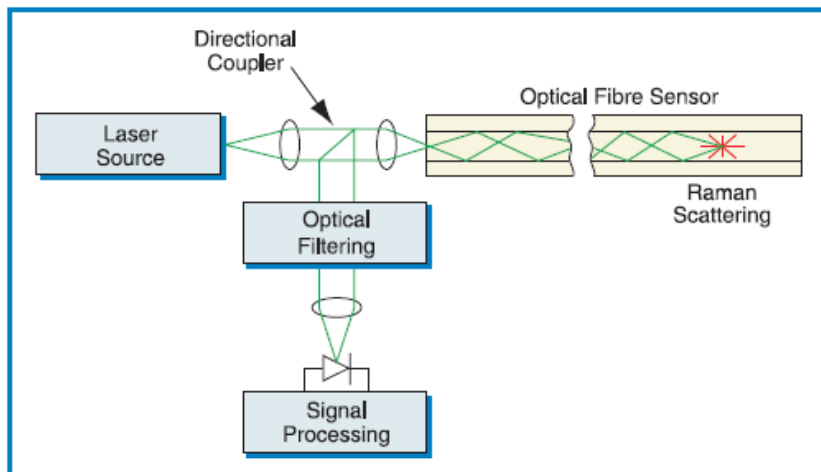
5.1 Yleistä mittauksesta

Kuituoptisilla mittalaitteilla saavutetaan pitkäaikainen mittaustapahtuma rakennuksen rakenteiden kannalta. Antureiden asennuspäivä on vasta ensimmäinen merkkipaalu itse mittauksen lähes 50 vuotta kestävässä ajanjaksossa. Mittalaitteet mittaavat rakenteiden kuntoa koko tuon ajanjakson ennalta määritellyllä tavalla, tarkkuudella ja syklillä.

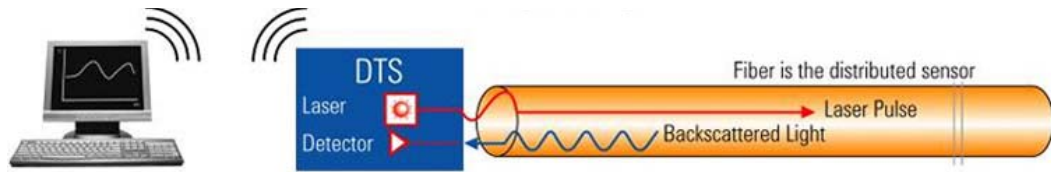
Mittauslaitteistojen toiminta voidaan toteuttaa etäkäyttönä, jolloin itse työmaalla ei tarvita kuin optinen anturijärjestelmä sekä verkkoyhteys Internetiin. Etäkäytön etuna on monen eri työmaan mittausjärjestelyjen yhdistäminen yhdelle tai useammalle mittalaitteelle samanaikaisesti. Tällöin kaikki eri mittausanturit eritellään omalla osoitteella, jolloin niiden etätarkastelu voidaan toteuttaa. Mittaustulosten analysoinnin jälkeen tulokset jaetaan eteenpäin työmaan henkilöille, jotka tarvitsevat mittatietoja. Lähettäminen on nopeaa sähköpostin välityksellä.

5.2 Mittaustoiminto

Kohteen mittaaminen perustuu yksinkertaiseen toimintaympäristöön, joka sisältää laserlähettimen, mitta-anturin, optisen suodattimen, signaalin prosessointilaitteen sekä tietokoneen (kuva 16) (kuva 17).

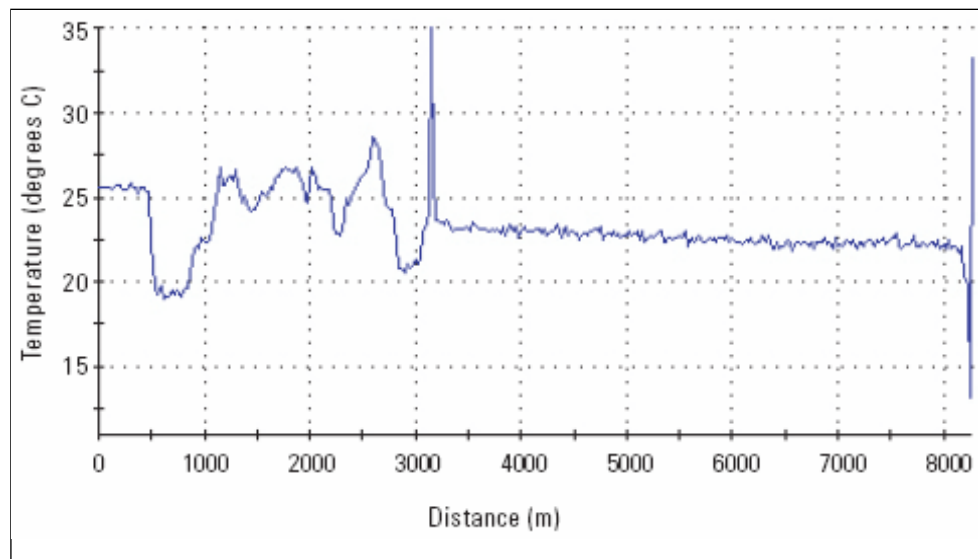


Kuva 16. Rakenteiden mittausperiaate Sensa Solutionin valmistaman tekniikan avulla. [8]



Kuva 17. DTS-mittauslaitteiston periaatekuvaus [8]

Mittauksessa lähetetty valopulssi siroutuu erinäisten vaikuttajien takia (Raman, Brillouin sekä Rayleighin siroutuma) ja palautuu takaisin signaalin prosessointikeskukseen optisen suodatimen kautta. Erittäin tarkan mittalaitteen ansiosta voidaan takaisin tulleesta valosta laskea lämpötilan muutos, matkaan kulunut aika ja sen kautta etäisyys (kuva 18). [8] Mittalaite voidaan myös kalibroida mittaamaan muita suureita, jolloin prosessiketju ei muutu mittaustavan mukaan. Mittaustekniikka on lähes kaikissa mittaustavoissa aivan samankaltainen. Ainoastaan mittausparametrit muuttuvat.



Kuva 18. Erään mittauskohteen lämpötilaprofiili. Huomaa etäisyyden ja lämpötilan suhde toisiinsa paikannuskeinona. [8]

5.3 Lämpötilan mittaus

Kaikista mittaustuloksista yksinkertaisimman, lämpötilanmittauksen, hyötyä voidaan miettiä rakennuksen elinkaaren ajalta. Lämpötilan perusteella rakenteista voidaan selvittää mahdoli-

sia lämpövuotoja, joita ei pysty erottamaan ilman mittalaitteita. Lämpövuotojen havainnointi lämpökameralla olisi helppoa, mutta tuolloin olisi havaittava jollain tapaa lämpövuoto ja sen mahdollinen kohta, joita lopulta alkaisi tutkia. Optisella anturitekniikalla mittaus voidaan toteuttaa esimerkiksi viikon välein, jolloin mittaustuloksista saadaan sopivan tarkka historia-tieto. Lämpötilojen muutos ei tapahdu hetkessä, ja vaurioiden syntyminen tapahtuu vasta pitemmän ajan kuluessa.

5.3.1 Vaurioiden havainnointi

Lämpötilan mittauksen avulla voidaan mitattavasta betonista määritellä siinä ilmeneviä vaurioita. Valussa syntyneet harvavalukohdat tai halkeamat havaitaan lämpötilan kohoamisen avulla (kuva 19) (kuva 20). Tämän havainnon ansiosta esimerkiksi harvavalukohta voidaan injektoida kuntoon, ennen kuin vaurio aiheuttaa suurempia vahinkoja. Lisäksi tällä tavoin saadaan etukäteen tietoa betonirakenteen elinikään vaikuttavista tekijöistä. [10.]

Kosteusvauriot voidaan havaita lämpötilamuutoksen avulla heti vahingon tapahtuessa. Kosteus nostaa betonin lämpötilaa yli $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, jolloin sen mittaus on mahdollista.



Kuva 19. Harvavalujen havainnointi lämpötilan avulla [10]



Kuva 20. Betonin mittauksen yhteydessä havaitut viat, joista on muodostettu kartta [10]

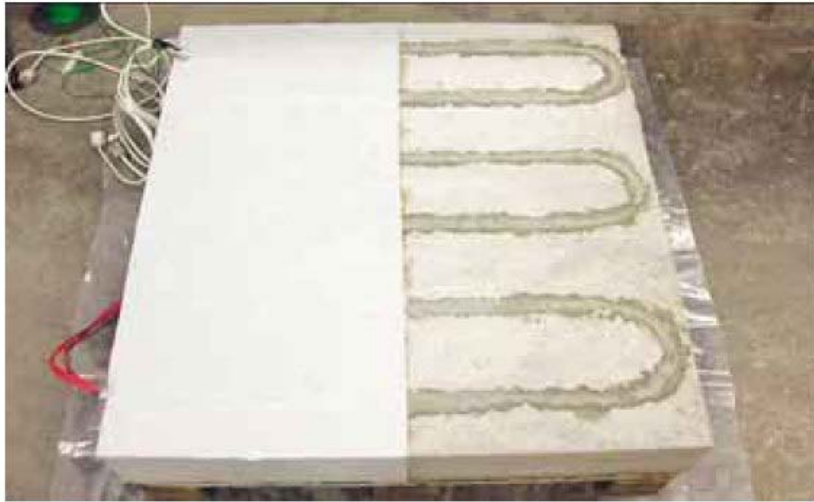
5.3.2 Kosteuden mittaus lämpötilan avulla

Kosteuden mittaus toteutetaan lämpötilan mittauksen ohessa. Kosteuden muutos rakenteessa nostaa yleensä lämpötilaa, jolloin sen havainnointi lämpötilan muutoksen avulla on helppoa. Tällöin on kuitenkin tarkastettava, ettei mitta-anturiin vaikuta mikään muu lämmitävä tekijä. Mittauksen avulla rakenteiden kosteuspitoisuudet pystytään tarkastamaan tarpeellisin väliajoin ja samalla niille voidaan asettaa hälytysrajat mahdollisten vuotojen tai vastavien varalle.

Kosteusmittausmenetelmän ansiosta kosteiden tilojen rakenteiden valvonta helpottuu eikä mittaustilanteessa tarvitse purkaa rakenteita. Kosteusvauriot voidaan havaita ennen kuin ne aiheuttavat vakavampia vaurioita.

Kosteusmittauksia varten optinen anturi voidaan asentaa kosteuseristekerrokseen, valun pintakerrokseen tai betoniraudoitteeseen, koska asennettavan mikroputken halkaisija on vain 3 tai 5 mm. (kuva 21) Tuolloin anturi antaa luotettavia tietoja lämpötiloista, jotka johtuvat kosteuden muutoksista. Antureiden asentamisesta on tehtävä tarkempia tutkimuksia, koska niiden toiminnasta ei ole julkaistu muuta tietoa kuin karkeita analyyssejä. Tämän takia mitta-laitteella on testattava kaikki mahdolliset asennussyvytydet.

On huomioitava, että edellä mainittu kosteusmittausanturi ei mittaa tuolloin betonin suhteellista kosteutta. Suhteellisen kosteuden mittausta varten anturikaapeli on asennettava porareikämittausten ohjekortin RT 14–10675 mukaan.



Kuva 21. Anturin asennus kosteuseristeen alle [10]

5.4 Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen

Suhteellinen kosteus vaikuttaa betonissa moniin eri tekijöihin. Kosteuden johdosta betonissa tapahtuu ainakin seuraavia reaktioita:

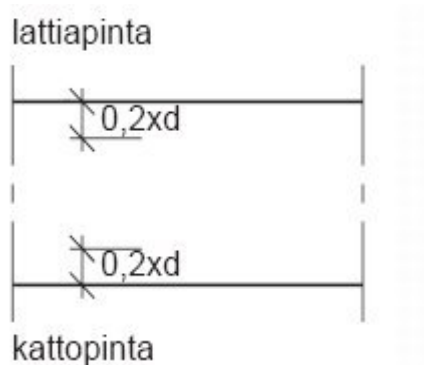
- sementin hydrataatio sekä sementtiliiman huokoisuus
- karbonaatioaste
- kloridien kasvu
- rakenneterästen ruostuminen
- pakkasrapautuma
- alkaali-silikaatireaktiot,

joiden tarkkailua mittaustekniikka voi helpottaa. [14.]

Betonin suhteellisen kosteuden mittaaminen on mahdollistettu kosteuden reaktiosta silikaattipintaan ja sen aiheuttamasta paine-erosta, joka aikaansaa valon siroutuman. Suhteellisen kosteuden mittaaminen toimii, kuten kohdassa 4.2 selvitetään. Itse mittauksen ansiosta voidaan betonin valun yhteydessä aloittaa kosteuden seuranta, jonka ansiosta tuleva päällystettävyyden voidaan määrittää. Tämä mahdollistaa tarkemman aikataulutuksen työmailla, koska päällystettävyyden on usein ratkaisevana tekijänä työmailla.

Optisen kuidun asennus betonin suhteellisen kosteuden mittausta varten

Kuidun asennus täytyy toteuttaa tätä tarkoitusta varten rakennetulla harjateräskehikolla, jolla kuitu voidaan asentaa oikeaan mittaussyvyyteen. Syvyyden määrittelee RT-kortti 14–10675, joka sisältää betonin kosteusmittausohjeet. Kyseisessä RT-kortissa ilmenevät asennussyvyydet ovat suositussyvyyksiä myös optiselle kuituanturille kunnes anturia on testattu eri olosuhteissa riittävän paljon. Testausten avulla voidaan myöhemmin tarkentaa oikeaa kuituanturin asennussyvyyttä (kuva 22). [13.]



Kuva 22. Suhteellisen kosteuden mittaussyvyydet massiivisessa välipohjassa RT-kortti 14–10675 mukaan [13]

Kuidun asennusta varten on tehtävä tarkempia tutkimuksia, jotta saadaan varmistus siitä, voiko anturikaapelia asentaa esimerkiksi suoraan betonirauδοitteisiin. Todennäköistä on kuitenkin se, että kaapeli täytyy asentaa porareikämittaussyvyyteen. Rauδοitteisiin asentaminen helpottaisi työmaalla tapahtuvaa asennustyötä, koska tuolloin valun sisään ei tarvitsisi rakentaa erillisiä kehikoita kaapeleita varten, mutta tuolloin ei taasen ole varmuutta siitä miltä korkeudelta mitta-anturi mittaa suhteellista kosteutta.

5.5 Kuidun puhallus suojaputkeen

Optinen anturikaapeli asennetaan ruotsalaisen Ericssonin kehittämällä Ribbonet-periaatteella, jossa kohteeseen tai rakenteeseen asennetaan ensiksi suojaputki (kuva 23), jonka sisään lopulta puhalletaan optinen kuitu sitä toimintoa varten kehitetyllä laitteella (kuva 24). Tällä tavoin vältetään kaikenlaiset tahattomat kuitukaapelin rikkoutumat, joita työmaalla voisi sattua. Ribbonet-kuitu puhalletaan putkeen yleensä valun loputtua, jolloin rakenteet voivat aloittaa rauhallisen kuivumisen ilman ylimääräisiä rasituksia.



Kuva 23. Ericssonin käyttämä mikroputki (DI), jonka sisään kuitu puhalletaan [19]



Kuva 24. Ribbonet-puhalluskuidun asennustyökalu [15]

Yhden puhalluskuituanturin enimmäispituus ennen sen jatkamista liitoksella on yksi kilometri. Puhalluskuitu voidaan myös teoriassa poistaa suojaputkestaan, jos sen käyttö huomataan tarpeettomaksi mahdollisen elementin siirron tai kuivumisen takia. Tällöin kuitua vedetään takaisin päin kelan ympärille paineilman avulla. Takaisin vedettyä kuitua on periaatteessa mahdollista käyttää uudelleen, jos siihen ei havaita tulleen vaurioita.

Mikroputken sekä puhalluskuidun eduksi perinteisiin kuitukaapeleihin verrattuna voidaan sanoa seuraavaa:

- Vaiheittaisen asennuksen ansiosta aloituskustannukset ovat pienemmät.
- Vaiheittaisen laajennuksen takia lisäasennus on nopeampi ja edullisempi.
- Lisäksi vältetään ympäristön lisäkuormitus.

- Hyvän laadun ansiosta kuidut eivät vaurioitu hankalissakaan olosuhteissa asennuksen aikana.
- Ylläpidon helppouden takia kuitujen korjaus on yksinkertaista.
- Kuitujen pikaliittimien ansiosta liitosten hitsausmäärät ovat huomattavasti pienemmät, jonka seurauksena asennusaika lyhenee. [19.]

5.6 Mitattavat suureet

Mitattavasta kohteesta voidaan ottaa tarpeen mukaan tietoina ja arvoina ulos:

- lämpötilan muutokset
- erinäiset nesteiden vuodot sekä lämpövuodot
- kosteuden muutokset
- paine-erot
- suhteellisen kosteuden muutokset
- halkeamat ja harvavalut
- siirtymät.

Näiden mittasuureiden hyödyntämistä voidaan muokata tarpeen mukaan kohteesta riippumatta. Mittalaitteiden monipuolisuuden tarkoituksena on saavuttaa yhdellä mitta-anturijärjestelmällä kattava mittausverkko, jonka avulla rakenteiden ja rakennuksen valvonta helpottuu.

5.7 Mittauskohteet

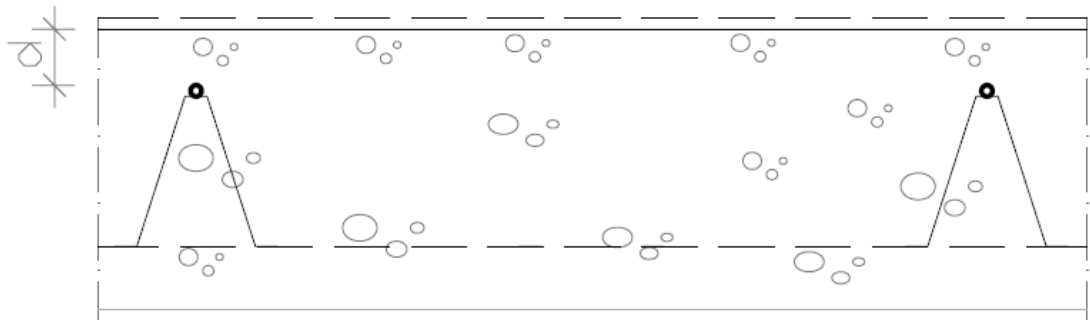
Optisilla antureilla voidaan mitata monenlaisia kohteita ja rakenteita. Olen seuraavassa selvittänyt joidenkin eri rakenteiden mittausta sekä niistä saatavia mittasuureita. Työn ohessa olen tarkastellut mittausjärjestelmien soveltuvuutta eri rakennusteollisuuden osa-alueille kuten elementtiteollisuudelle. .

5.7.1 Välipohjarakenteet

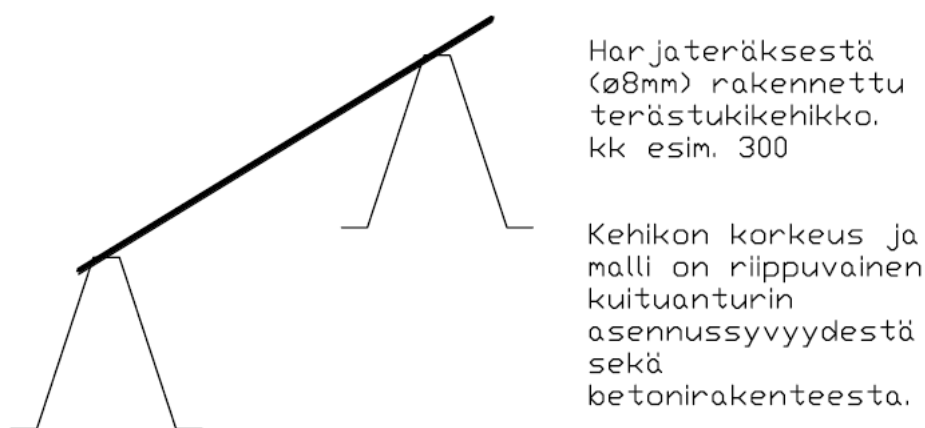
Suhteellisen kosteuden mittaus

Rakennuskohteissa mitta-anturia voidaan käyttää hyväksi välipohjavalujen tarkkailussa. Välipohjien seurannassa tarkastellaan betonin kuivumista, jonka avulla betonin päällystettävyyttä voidaan ajallisesti määrittää. Lisäksi anturin asennuksella voidaan seurata valun onnistumista sekä myöhemmässä vaiheessa havaitaan välittömästi esimerkiksi halkeamien syntymiset.

Suhteellisen kosteuden seurannan kannalta anturin asentaminen on toteutettava niin, että laatan paksuus määrittää anturin asennussyvyyden. Tämä asennustoimenpide täytyy toteuttaa sitä varten valmistetulla kehikolla tai telineellä, jotta anturi saadaan oikeaan syvyyteen (kuva 25) (kuva 26).

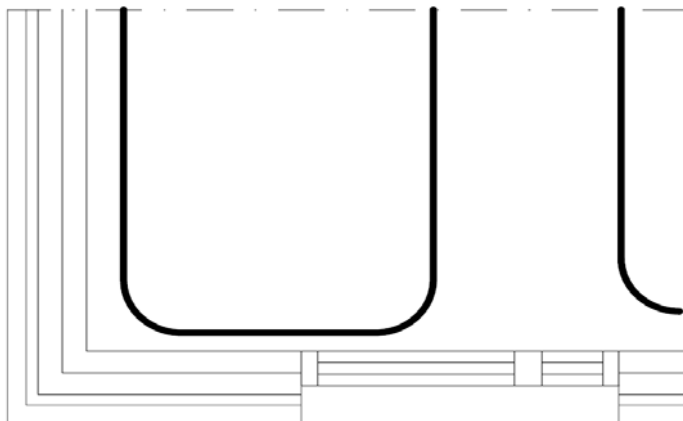


Kuva 25. Välipohja-asennuksen leikkauskuva. Huomioi kuidun tarvitsemat kehikot.



Kuva 26. Harjaterästukikehikko anturin oikean asennussyvyyden saavuttamiseksi (luonnos).

Tällöin mitta-anturi antaa tarkkoja mittatuloksia ja samalla tulokset ovat verrannollisia porareikämittauksessa saataviin mittaustuloksiin. Asentamisessa on myös huomioitava, että anturikaapelia ei tarvitse asentaa koko laatan pinta-alalle. Tuolloin riittää, että kaapelia on asennettu riittävästi, mutta ei liian tiheästi. Liian tiheän asennuksen seurauksena betonin työstö valun yhteydessä hankaloituu huomattavasti, koska tukikehikoiden määrä kasvaa tuolloin. Siksi anturikaapeleita on syytä asentaa harvakseltaan ja laajalle alueelle, jotta välipohjasta voidaan ottaa satunnaisotannalla betonin kosteusarvoja (kuva 27).



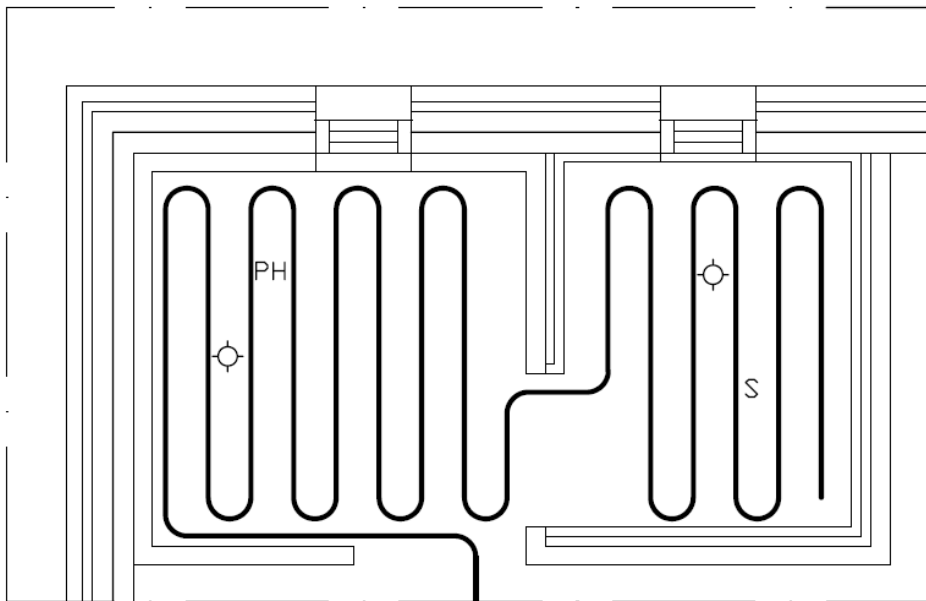
Kuva 27. Anturikaapelin asennus välipohjarakenteisiin subteellisen kosteuden mittausta varten.

Tukikehikkojen asentaminen on täysin rakentajasta ja suunnittelijoista riippuvainen. Kehikon rakentaminen kasvattaa rakentamiskustannuksia materiaalin ja työpanoksen takia. Tämän takia on syytä harkita kehikkojen käytön hyötyä. Lisäksi on huomioitava, että kehikkojen avulla tehtävästä mittauksesta ei ole vielä tutkimustuloksia, joten tekniikkaa voi mahdollisesti

soveltaa ja toteuttaa myös ilman tukikehikkoja. Tämä vaatii kuitenkin vielä monia erilaisia tutkimuksia.

Kosteiden tilojen mittaus

Kosteita tiloja mitattaessa optinen kuituanturi on asennettava eri tavalla kuin suhteellisen kosteuden mitta-anturit laatassa. Optisien antureiden määrää on ensinnäkin lisättävä, jotta vauriot voidaan havaita heti niiden ilmetessä sekä niiden asennusalue on määritettävä tarkkaan. Asennusalueena voi esimerkiksi toimia pelkkä kosteatila, jonne anturi asennetaan mahdollisimman lähelle pintaa. Pinnan lähelle asennettuna anturi toimii herkemmin ja havaitsee mahdolliset vuodot ja vauriot nopeasti. Kosteusvaurion havainnointi tapahtuu kosteuden aiheuttaman lämpötilamuutoksen ansiosta. Asennuksessa on myös huomioitava lattia-kaivojen sijoittelu rakenteeseen (kuva 28). Lattia-kaivojen vierustat on syytä ohittaa mahdollisimman läheltä kaapelia hyväksikäyttäen. Tällöin kaivossa olevat puutteet sekä mahdolliset vauriot ilmenevät nopeasti ennen kuin ne ehtivät aiheuttaa suurempaa vahinkoa.



Kuva 28. Esimerkkitapaus kuidun asentamisesta kosteisiin tiloihin.

Kosteat tilat on mahdollista erottaa muista mitattavista kohteista määrittämällä ne omaksi mitta-alueeksi. Tuolloin mittalaite mittaa ainoastaan kosteusvaihteluita kyseisessä tilassa. Etuna tässä on mittalaitteen koko kapasiteetin hyväksikäyttö ja nopea mittaussykli. Tällaiseen alueeseen voidaan sisällyttää niin lattiapinnat kuin kosteantilan seinäpinnat. Tällöin koko tila

saa oman mittauskarttansa, jonka avulla vuotoja ja vaurioita on helppo havainnoida. Kun kuitua asennetaan kosteisiin tiloihin ja varsinkin lattiarakenteisiin, on tuolloin huomioitava lattialämmityksen vaikutus mittaukseen. Lämmitys vääristää sinällään mittausarvoja, mutta mittalaitteella on näillä näkymin mahdollista häivyttää lattialämmityksen aiheuttama lämpötilan muutos. Tämän häivytyksen ansiosta mittalaitteella saadaan tarkkoja mittaustuloksia rakenteista. Tällaista ratkaisua ei ole kuitenkaan vielä testattu, joten projektin etenemisen kannalta on tärkeää kokeilla mitta-antureiden toimintaa niin vesikiertoisen kuin sähköisen lattialämmityksen osalta.

Tällaisessa mitta-alue tapauksessa mitta-anturi tulee asentaa erilliseksi kokonaisuudeksi. Tämä tapahtuu siten, että anturi asennetaan normaalisti rakenteisiin, mutta sen mittapää nostetaan erilliseksi lähdöksi mittalaitteelle. Tällöin mittalaite mittaa vain kyseisen kohteen mittasuureita.

5.7.2 Seinärakenteet

Kosteat tilat

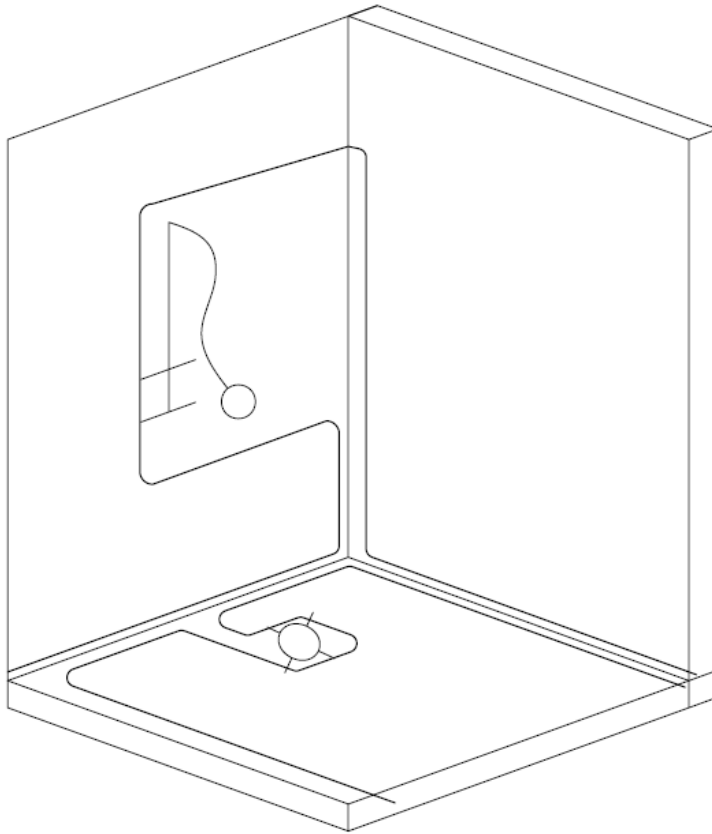
Kuidun asennusta kosteissa tiloissa voidaan myös miettiä seinien osalta. Seinissä kuituanturi voidaan mahdollisesti asentaa tasoitteen tai kosteuseristeen alle. Varsinkin kosteuseristeen alle asennettaessa eristeen määrä saattaa nousta suhteettoman suureksi, jonka seurauksena kustannukset voivat nousta tavattomasti. Ainoa etu tässä asennustavassa on se, että eristeen alla ollessaan mitta-anturi havaitsee välittömästi vuodot eristeissä. Tätä asennustapaa on kuitenkin harkittava kohdekohtaisesti ja sitä pitää päästä testaamaan, jos se havaitaan järkeväksi vaihtoehdoksi. Tasoitekerros antaa uudenlaisen asennusmahdollisuuden. Tässä tapauksessa kuitu voidaan asentaa mahdollisen asennusmaton ansiosta ensiksi seinärakenteeseen kiinni, jonka jälkeen sen päälle levitetään tasoitekerros (kuva 29). Tällöin anturi toimii erinomaisessa ympäristössä ja samalla sen mittatarkkuus on hyvää luokkaa. Kuitu voidaan asentaa joko vaaka- tai pystytasoon. Asennustapa sekä -tiheys ovat aina riippuvaisia tilanteesta ja tapauksesta.



Kuva 29. Esimerkki optisen kuituanturin asentamisesta kosteantilan seinärakenteeseen.

Kuidun asentamista seiniin ei ole testattu vielä missään olosuhteissa, joten sen kokeileminen on ehdoton edellytys ennen toteutuksen käytäntöön panemista. Testauksen avulla saavutetaan optimaalisin asennuspinta, jonne kuitu on järkevintä, niin taloudellisesti kuin teknisesti, asentaa.

Kuidun asentamispintoja kylpyhuonetiloissa voisi olla seinärakenteet sekä lattiat. Tällöin on kuitenkin syytä miettiä kustannustehokasta asentamistapaa. Kuitua asennettaisiin kriittisiin pisteisiin, kuten lattian ja seinän rajapintoihin ja liitoksiin, suihku pisteen ympäristöön sekä nurkkiin. Tällöin pystyttäisiin eliminoimaan ennalta tiedetyt riskikohdat, joissa kosteusvaurioita syntyy useimmiten (kuva 30).



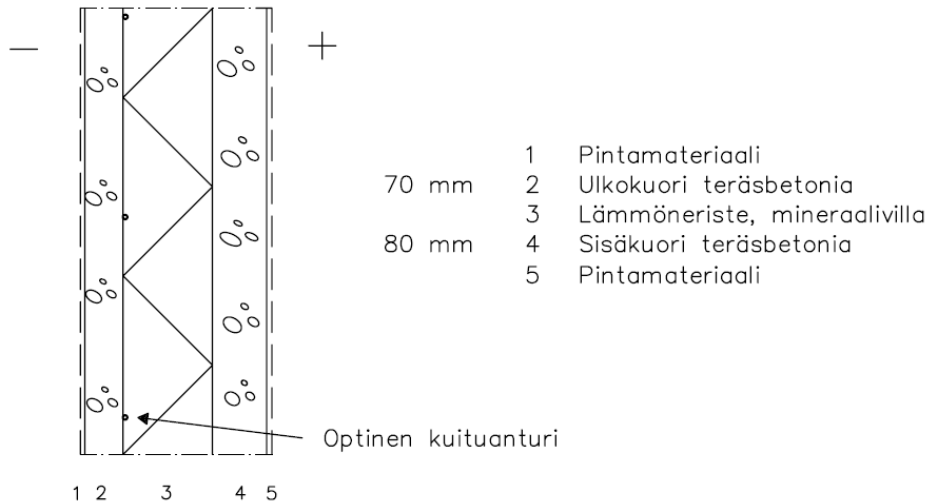
Kuva 30. Optisen mitta-anturin asentaminen kostean tilan kriittisiin pisteisiin.

Kuidun asentaminen onkin aivan uusi rakentamisala, joka vaatii omanlaisensa suunnittelijat. Suunnittelijan on ymmärrettävä kuidun toiminta ja mahdollisuudet sekä tiedostettava rakennuksien yleisimmät riskipisteet. Suunnittelijoiden kokemus alkaa karttua vasta, kun tuotteista saadaan hyviä tuloksia ja niiden käyttöalueet voidaan rajata tarkasti.

Ulkoseinärakenteet

Ulkoseinärakenteissa optinen kuituanturi voidaan asettaa mittaamaan erinäisiä lämpövuotoja, joita eristekerrosten viallisesta asennuksesta tai rakenteen toimimattomuudesta seuraa. Tällaisissa mittaustilanteissa anturin asentaminen tapahtuu eristekerrosten ulko- tai sisäpintaan (kuva 31). Asennuksessa voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi anturimattoa, jossa kuidut on ennalta asennettu mattoon kiinni. Mittauksen avulla seinärakenteen kuntoa voidaan mitata ennalta määrätyissä sykleissä. Tällöin esimerkiksi kerran päivässä saadun mittatuloksen avulla voidaan määrittää seinärakenteessa tapahtuvat muutokset ja vauriot. Lisäksi mittauksessa voidaan samalla tarkastaa mahdolliset kosteusvauriot, joita seinän sisälle voi muodostua mahdollista seinärakenteiden vuotokohdista, kuten ikkunapelleistä sekä elementtien sau-

moista. Mittauksen avulla seinärakenteen vaurioituminen voidaan estää kosteusvuotojen osalta.



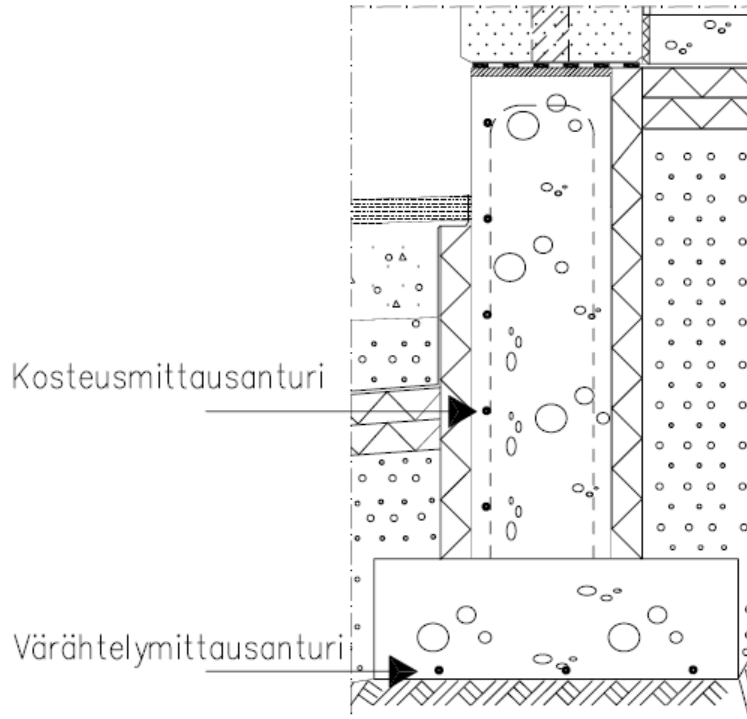
Kuva 31. Esimerkki kuidun asentamisesta ulkoseinään.

5.7.3 Anturat ja sokkelit

Anturoiden ja sokkeleiden mittauksessa tärkeitä mittasuureita ovat kosteuden vaihtelut, rakenteiden liikkumat, murtumat sekä erinäiset liikenteestä aiheutuvat värähtelyt. Mittaus onkin toteutettava aina omana kokonaisuutena rakennuksesta riippumatta. Tällöin jokaisen kohteen osalta tehdään alustava suunnitelma siitä, mitä kohteen perusrakenteista halutaan mitata ja millä tarkkuudella. Esimerkiksi värähtelymittausta on turha toteuttaa rakennuksissa, joissa ei ole lähettyvillä raskaasti liikennöityjä teitä. Värähtelymittaus on vielä hieman tuntemattomampi mittauskeino, jolloin sen esittelyä ei toteuteta tässä työssä. Kuitenkin värähtelymittausta on jo testattu ja siihen soveltuvia mittalaitteita on alettu kehittää. Mittaus voidaankin toteuttaa myöhemmässä vaiheessa testausten jälkeen, jolloin mittauksesta on saavutettu tarkkoja tuloksia sekä käytännön esimerkkejä.

Kosteusmittaus voidaan toteuttaa samalla tavoin kuin edellä mainituissa seinä- ja lattiarakenteissa. Mitta-anturi on asennettava lähelle sokkelin ulkopintaa, joka on kosketuksissa maa-ainesten kanssa (kuva 32). Tällöin voidaan havaita kosteuden siirtymät rakenteisiin hy-

vissä ajoin. Anturan mittaamisen avulla voidaan helposti ennaltaehkäistä mahdollisen pohjaveden tai kapillaarinousun aiheuttamat kosteusvauriot.



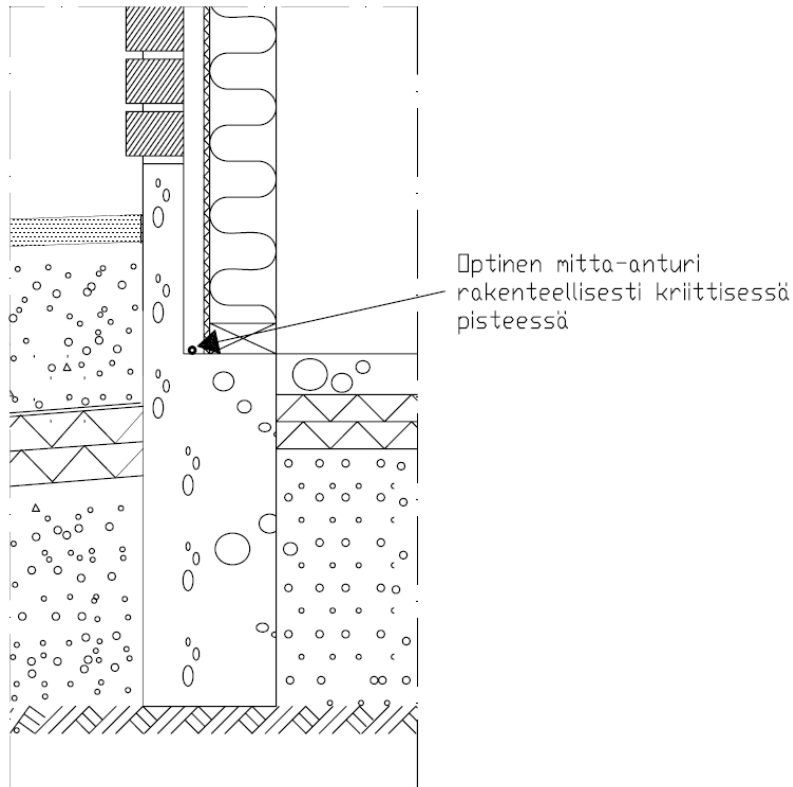
Kuva 32. Kosteus- ja värähtelyanturin esimerkkiasennus.

Kosteusmittauksen ansiosta sokkelin kostuminen voidaan ehkäistä ennalta mittauksen avulla. Tällöin maaperästä siirtyvän kosteuden vahingot voidaan minimoida. Lisäksi rakennuksissa, joihin rakennetaan maansisäinen kerros, voidaan seinien kosteusvaihteluita sekä lämpötilojen muutosta valvoa. Esimerkiksi rakennuksessa, johon on rakennettu sauna maan alle, voidaan mittausjärjestelmällä tarkkailla, onko eristeet asennettu oikein ja välittykö seinän kautta hukkalämpöä ulkopuoliseen maaperään.

5.7.4 Riskirakenteet

Aikoinaan uusiin rakennuksiin rakennettiin niin kutsuttu piilosokkeli, jonka ansiosta lattia-rakennetta voitiin laskea maanpintaa alemmas. Tämän väärän rakennustavan seurauksena kiinteistöihin syntyi kosteusvaurioita juuri tuohon lattian ja seinän liitoskohtaan. Nykyisin kyseistä rakennetta ei enää valmisteta, mutta uusissakin rakennevaihtoehdoissa on joitain ongelmallisia pisteitä, joissa kosteus- tai muita vastaavia vaurioita syntyy. Tämän takia optinen

kuitu mahdollistaa tällaisten vaikeiden pisteiden hallintaa ja tarkkailua. Kuitu voidaan asentaa kriittisen pisteeseen, jossa se mittaa pitkällä syklillä (kerran viikkoon) kosteuden muutoksia (kuva 33).



Kuva 33. Optisen kuituanturin asentaminen riskirakenteisiin esimerkiksi piilosokkeliin.

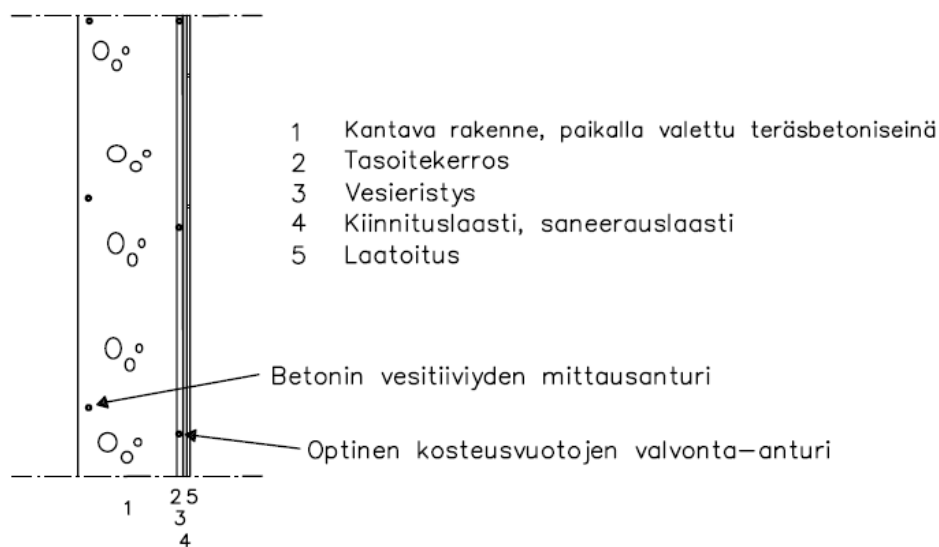
Tekniikan avulla voidaan ennalta ehkäistä esimerkiksi sokkelin ja seinän liitoskohtien vaurioita, räystäiden liitoskohtia seinän kanssa sekä väliseinien nousukohtia anturasta. Optisen kuidun asennus toteutetaan laittamalla kuitu johonkin pintaan, jossa oletettavasti voi syntyä vaurioita. Asennuksen jälkeen kuitu tuodaan mittalaitteistolle esimerkiksi sähkökaapeleiden ohessa seinärakenteissa. Jos kiinteistössä toteutetaan etäluentaa, on kuitu saatava liitettyä Internetiin mittaamisen toteuttamiseksi.

5.7.5 Allasrakenteet

Allasrakenteet ovat hieman toisenlaisia rakenteita mitattavaksi kuin esimerkiksi välipohjarakenteet. Altaissa on vastakkaisena pintana vesikerros, joka yleensä on vielä normaalia sisäilmaa lämpimämpi. Tästä seuraa hankala tilanne ajatellen mitta-antureiden toimintaa kysei-

sissä rakenteissa. Mittalaite on kalibroitava niin, että se häivyttää mittauksestaan normaalia korkeamman lämpötila-arvon eli juuri tuon kyseisen veden lämpötilan. Tällöin mittalaite havaitsee kosteuden muutoksesta aiheutuneen betonin lämmön muutoksen, jonka voi lopulta tulkita kosteusvuodoksi. Nämä tiedot perustuvat kuitenkin tällä hetkellä mittalaitevalmistajan antamiin suullisiin tietoihin, joten kosteusvuotojen mittausta allasrakenteissa on tutkittava tulevaisuudessa erikseen.

Kuituanturin sijoittaminen allasrakenteisiin tulisi toteuttaa niin, että anturi olisi mahdollisimman lähellä mitattavaa pintaa. Tällöin anturi kykenee havaitsemaan vuodot verekseltään estäen niiden leviämisen syvemmälle betonirakenteisiin. Suhteellisen kosteuden mittauksessa anturi tulee olla asennettuna oikeaan syvyyteen ja mittalaitteen täytyy tällöin olla kalibroituna oikean mittasuureen mittaukselle (kuva 34).



Kuva 34. Optisten antureiden esimerkkiasennus allasrakenteisiin.

Mikään ei kuitenkaan estä asentamasta betonirakenteeseen omaa mittausverkkoa harva-
 valujen ja suhteellisen kosteuden mittauksen varalle. Lisäksi betonirakenteeseen voidaan
 asentaa oma anturiverkko betonin tiivyyden mittaamiselle. Tällöin havaittaisiin helposti beto-
 nissa tapahtuvat muutokset. Todennäköisesti rakenteeseen voidaan asentaa esimerkiksi kaksi
 mittaavaa kuituverkkoa, mutta tuolloin mittalaitteen täytyy olla sellaista mallia, jolla voidaan
 erinäisin tavoin mitata montaa erillistä kuituanturiverkkoa. Etuina tällaisella kahden anturi-
 verkon järjestelmälle ovat kantavan betonirungon valun valvonta ja tarkkailu, kosteus val-
 vonta, tasalaatuisuuden seuranta sekä vesipinnan muodostaman kostumisriskin tarkkailu ja

seuranta. Kuituverkot tarkkailevatkin tällöin koko rakennetta yhtenä suurena kokonaisuutena.

5.7.6 Putket ja viemärit

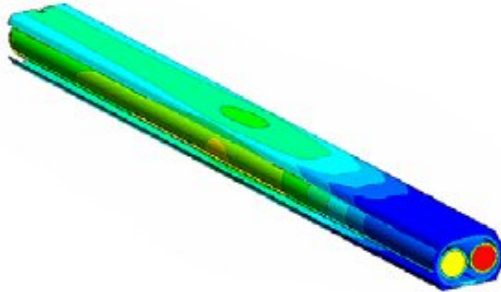
Rakennuksen tontilla sijaitsee usein monia erinäisiä putkia, joiden tarkkailussa olisi mahdollista käyttää optista kuitutekniikkaa. Esimerkiksi salaojaputkien toimivuutta pystyttäisiin tarkkailemaan mahdollisten tukkeutumien ja vaurioiden varalta. Tukkeutumien ilmetessä salaojaputkessa vesi patoutuu tukon taakse aiheuttaen maaperän ylimääräistä kostumista. Tämä tapahtuma nostaa samalla maan lämpötilaa, jolloin optinen anturi havaitsee lämpötilan muutoksen. Tuon muutoksen avulla pystyttäisiin paikallistamaan tukkeuman paikka tarkasti ja tällä tavoin korjaaminen helpottuu.

Kaukolämpöputken tarkkailu on myös yksi kohde, jonne optista mitta-anturia voidaan miettiä käytettäväksi. Kaukolämpöputkien ollessa maan alla, sen pintaan asennetaan kuitukaapeli nippusiteillä tai jollain muulla vastaavalla keinolla (kuva 35). Lopulta kuitukaapeli liitetään mittalaitteeseen, jotta siitä saadaan ulos lämpötila-arvoja. Mittaus syklin voi erikseen määrittellä tarpeen mukaan.



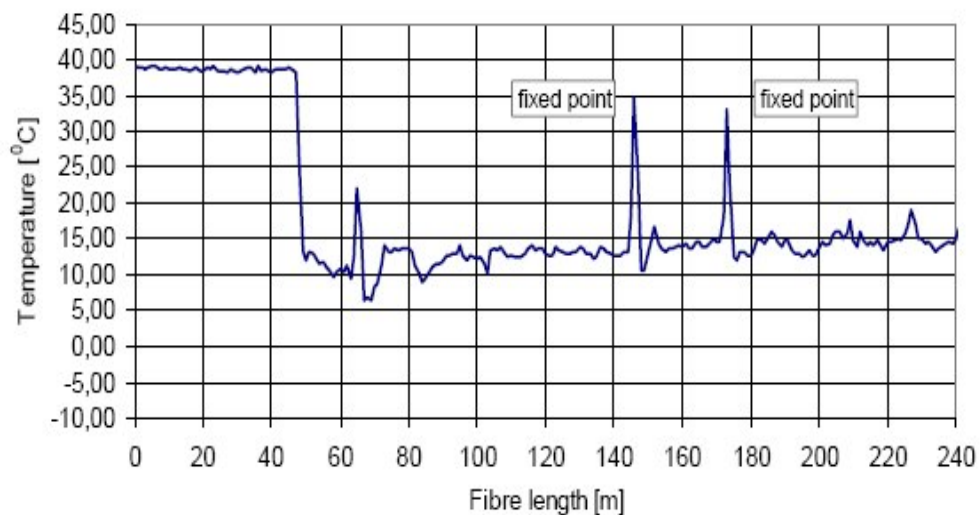
Kuva 35. Optisen kuidun asennus kaukolämpöputkeen. [20]

Putken pinnassa olevan anturin avulla kaukolämpöverkon lämpötilojen esittäminen yksinkertaistuu. Tarkan värikuvan avulla havaitaan kohonneet lämpötilat, jotka usein ovat suoraan verrannollisia vaurioihin (kuva 36).



Kuva 36. Periaatekuva kaukolämpöputken lämpötilanmittauksesta. [20]

Lisäksi anturijärjestelmällä voidaan määrittää vuodon kohta metrin tarkkuudella (kuva 37). Tämän ansiosta mahdollisen vaurion esiintymistä ei tarvitse odottaa näkyvän pintapuolisesti. Tekniikan avulla vuodosta aiheutuvat vauriot maarakenteille voidaan ehkäistä nopealla ja tarkalla vuodon havainnoinnilla sekä paikallistamisella.



Kuva 37. Kaukolämpöputken mittaustuloksia. Huomioi lämpötilan ja pituuden muutokset. [20]

5.7.7 Betonielementtiteollisuus

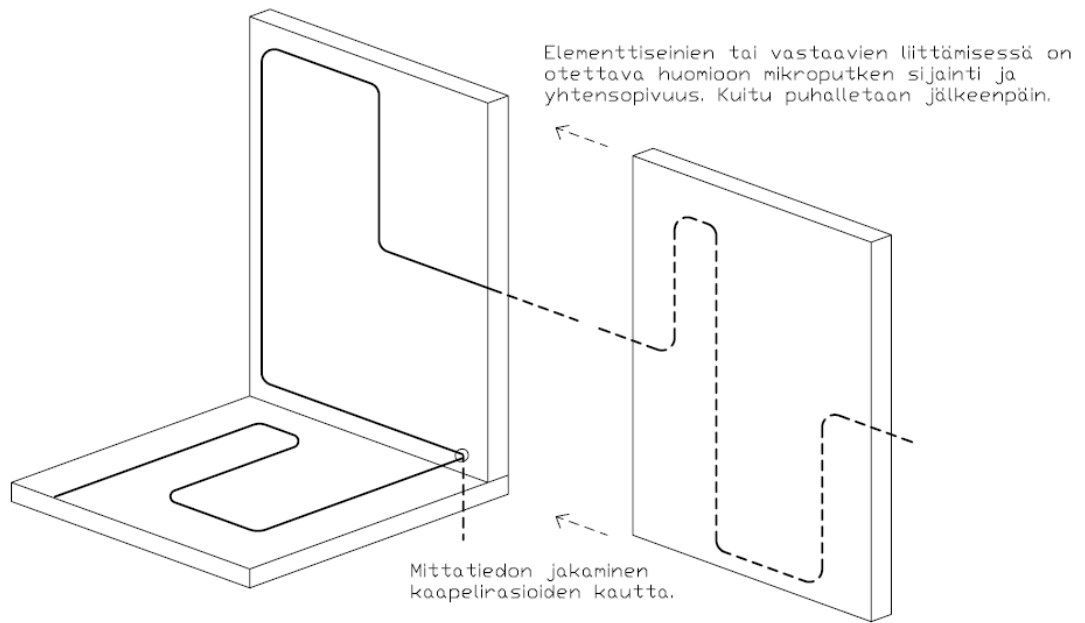
Betonielementtiteollisuudelle optisien antureiden mahdollistamat hyödyt tulevat esiin jo valupöydällä. Tuolloin valettavaan kappaleeseen asennetaan oikeaan syvyyteen kuituanturit. Suhteellisen kosteuden mittauksessa sekä betonin laadunvarmistuksessa anturin tulisi asentaa niille määrättyihin syvyyksiin, jotka pohjautuvat porareikämittauksessa käytettäviin ohjearvoihin. Asennuksen valmistuttua mittalaitteistolla voidaan tarkkailla betonin lujuuden kehittymistä sekä mahdollisten vikojen ilmenemistä. Tällaisissa tapauksissa optinen anturi voidaan myös poistaa suojaputkestaan, jolloin betonielementtiin jää sisälle muovinen suojaputki. Tätä suojaputkea voidaan käyttää hyväksi työmaalla mahdollisen uuden mittausanturin asennuksen kannalta. Etuna tässä voidaan pitää valmista betonielementtiä, jonka sisällä on jo valmistusvaiheessa asennettu suojaputket tai anturimatto sille määrättyyn asennuspintaan. Tämän ansiosta elementti voidaan liittää rakennuksessa olevaan anturiverkkoon, josta lopulta saadaan koko rakennuksen kattava mittausjärjestelmä.

Optinen kuitu mahdollistaakin laadunvalvonnan jo tuotantovaiheessa ja työmaalle saavuttuaan elementin omaa mikroputkijärjestelmää voidaan hyödyntää sataprosenttisesti. Kuidun puhaltaminen suojaputkeen edellyttääkin elementtitehtailta omaa puhalluslaitetta. Kuituantureiden avulla elementtiteollisuuden laadunvarmennus kehittyy entisestään ja huonojen sekä valuvikaisten elementtien pääsy työmaille on lähes mahdotonta tarkan valvontajärjestelmän ansiosta.

5.8 Mitta-antureiden liittäminen

Kun mitta-antureita on testattu konkreettisissa olosuhteissa ja niiden avulla pystytään mittaamaan luotettavasti vaadittavia suureita, tulee kysymykseen anturiverkkojen liittäminen toisiinsa ja tiedon jakaminen verkossa. Tätä varten on kehitettävä tekniikoita, joilla esimerkiksi esivalmistettujen seinäelementtien anturiverkot voidaan asentaa toisiinsa kiinni. Tämä kuitenkin edellyttää elementtitehtailla tapahtuvaa anturiverkkojen asentamista. Itse työmaalla tehtävät mittausverkot on helppo liittää toisiinsa liittimien avulla ja verkkojen liitokset tuleekin suojata jonkinlaiseen rasiaan seinällä (kuva 38). Yleisesti voidaankin sanoa, että esimerkiksi lattiarakenteessa oleva anturiverkko nostetaan jostain kulmasta seinälle sähkörasiaan tai vastaavaan, josta se on lopulta helppo jakaa Internettiin etäkäyttöä varten. Jos kyseessä on

hetkellinen mittaus, jota ei ole tarkoitus jatkaa myöhemmässä vaiheessa, voidaan mittalaite liittää suoraan työmaalla anturiverkkoon. Tällöin eduiksi voidaan laskea vähäiset työmäärät ja nopeat mittaustulokset.

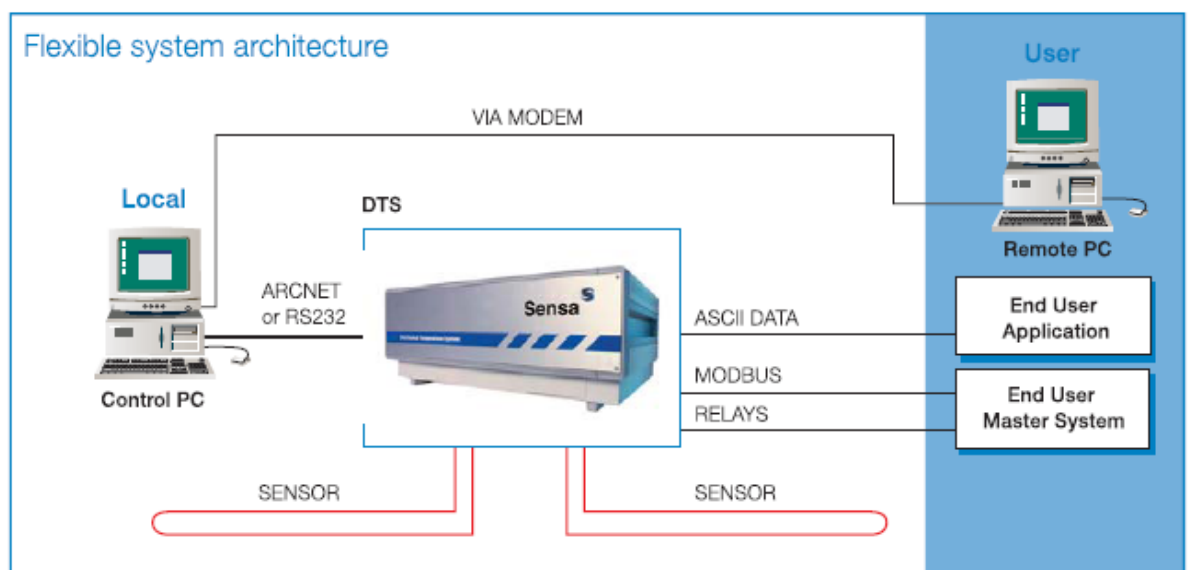


Kuva 38. Esimerkki anturiverkon liittämisestä elementtien välillä sekä tiedon jakaminen kaapelirasioissa.

6 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY

6.1 Mittaus Sensa Solutionsin ohjelmien avulla

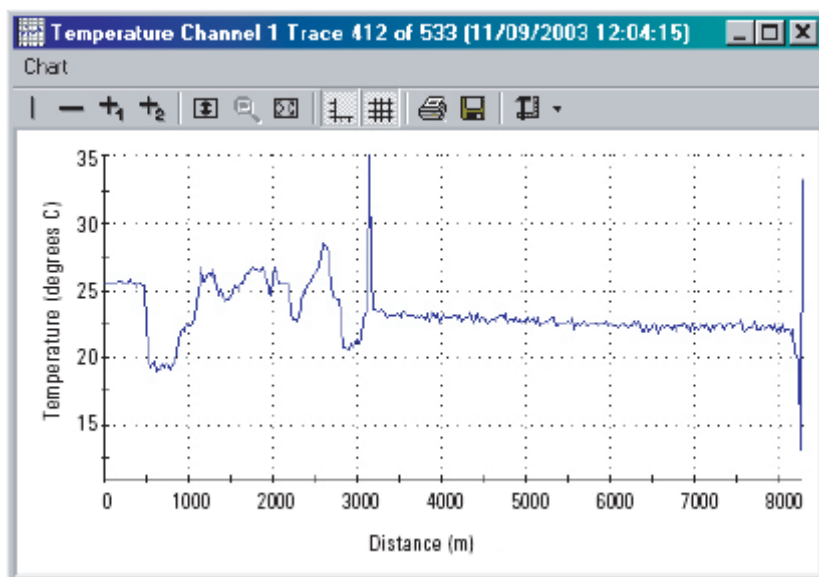
Tutkimuksessani tarkastellaan Sensa Solutionin kehittämää mittausohjelmia, koska tarkoituksenamme on päästä tekemään mittaustöitä Sensa Solutionin kehittämällä mittauslaitteilla. Laitteistokokonaisuudet voidaan koota toimimaan Internetin välityksellä niin, että mittaus-tuloksia voidaan tarkastaa myös muualla kuin mittalaitteen luona. (kuva 39)



Kuva 39. Sensa Solutionin mittauslaitteen toimintaympäristö [16]

6.1.1 Profile Data

Optisilla kuituantureilla mitattaessa mittalaitteen valmistaja tarjoaa omaa mittausohjelmaa tulosten tarkasteluun ja analysointiin. Esimerkiksi Sensa Solutions tarjoaa tulosten tarkasteluohjelmaksi Sensor Manager -ohjelmaa. Tämän ohjelman Profile data -sovelluksen avulla mitattavasta kohteesta saadaan Windows-pohjaiselle tietokoneen näytölle lämpötilaprofiili. (kuva 40) Profile data -sovelluksen ainoana huonona puolena on se, että mittauskohteesta ei saada muunlaisia arvoja ulos kuin nämä nimenomaiset profiiliarvot. Arvon muokkaus on näin ollen mahdotonta ja analysointi on toteutettava kuvassa 24 olevan profiilin pohjalta. [9.]

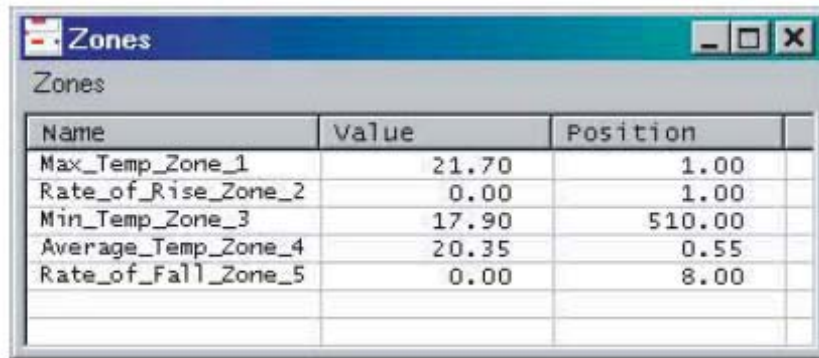


Kuva 40. Sensa Solutionin kehittämän Sensor Managerin tuottama lämpötilaprofilikuvaaja [9]

6.1.2 Zone Data

Sensa Solutions on kehittänyt Profile data-sovellukselleen vastaavanlaisen mittausohjelman, mutta laajemmalla muokkausmahdollisuudella. Tämä ohjelma kantaa nimeä Zone Data, joka tarkoittaa ennalta määrättyjen mittausalueiden (Zones) tarkastelua. Tässä sovelluksessa eri mitta-alueita voi olla 800–1000 kappaletta, mutta useimmiten käytetään noin 500:aa aluetta. Jokainen mitta-alue saa erikseen määritellyn alku ja loppu pisteen, jonka seurauksena mittausalue voidaan erotella myöhemmin kartoissa. Zone Data -mittaustoimintoon on sisällytetty hälytysarvojen käyttö, josta on kerrottu enemmän kohdassa 6.1.3. Jokaiseen mittausalueeseen voidaan määritellä arvojen palautusmäärä, joka määrää mittauksien tarkkuuden. (kuva 41) Näitä määreitä ovat: [9.]

- Average, joka tarkoittaa, että mittauksien tulokset ilmoitetaan keskimääräisinä arvoina.
- Maximum, joka tarkoittaa, että mittauksien tulokset ilmoitetaan maksimiarvoina.
- Minimum, joka tarkoittaa, että mittauksien tulokset ilmoitetaan minimiarvoina.
- Rate of Rise, joka tarkoittaa käyttäjän etukäteen ilmoittamien mittauspaikkojen suurinta mittausarvon nousua.

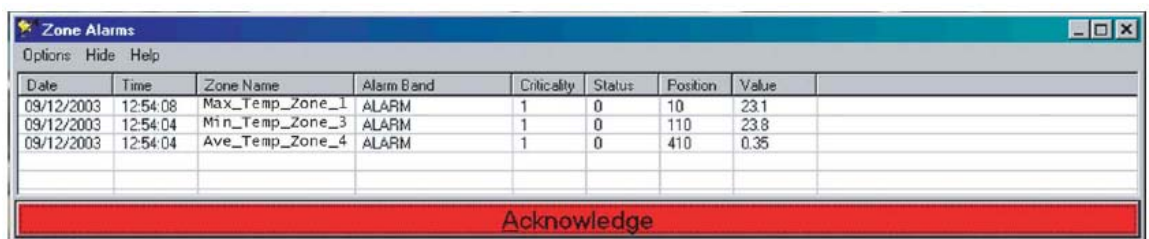


Name	Value	Position
Max_Temp_Zone_1	21.70	1.00
Rate_of_Rise_Zone_2	0.00	1.00
Min_Temp_Zone_3	17.90	510.00
Average_Temp_Zone_4	20.35	0.55
Rate_of_Fall_Zone_5	0.00	8.00

Kuva 41. Zone Data mittausohjelman määreiden määrittely kuvake [9]

6.1.3 Alarm Data

Sensa Solutions on mahdollistanut erilaisten hälytysarvojen (Alarm Data) asentamisen sovelluksiensa avulla. Hälytysarvoja voidaan kuitenkin asettaa vain Zone Data -ohjelmalle. Hälytysarvoiksi voidaan määrittellä mitattavien kohtien maksimi- ja minimiarvot. Jokaiselle eri mitta-alueelle (500–1000 kappaletta) on mahdollista määrittää omat hälytysarvonsa. (kuva 42) Hälytyksen tapahtuessa tieto hälytyksestä ja paikasta lähetetään joko mittauspisteen valvojalle tai työmaalla olevalle tietokoneelle. [9.]



Date	Time	Zone Name	Alarm Band	Criticality	Status	Position	Value
09/12/2003	12:54:08	Max_Temp_Zone_1	ALARM	1	0	10	231
09/12/2003	12:54:04	Min_Temp_Zone_3	ALARM	1	0	110	238
09/12/2003	12:54:04	Ave_Temp_Zone_4	ALARM	1	0	410	0.35

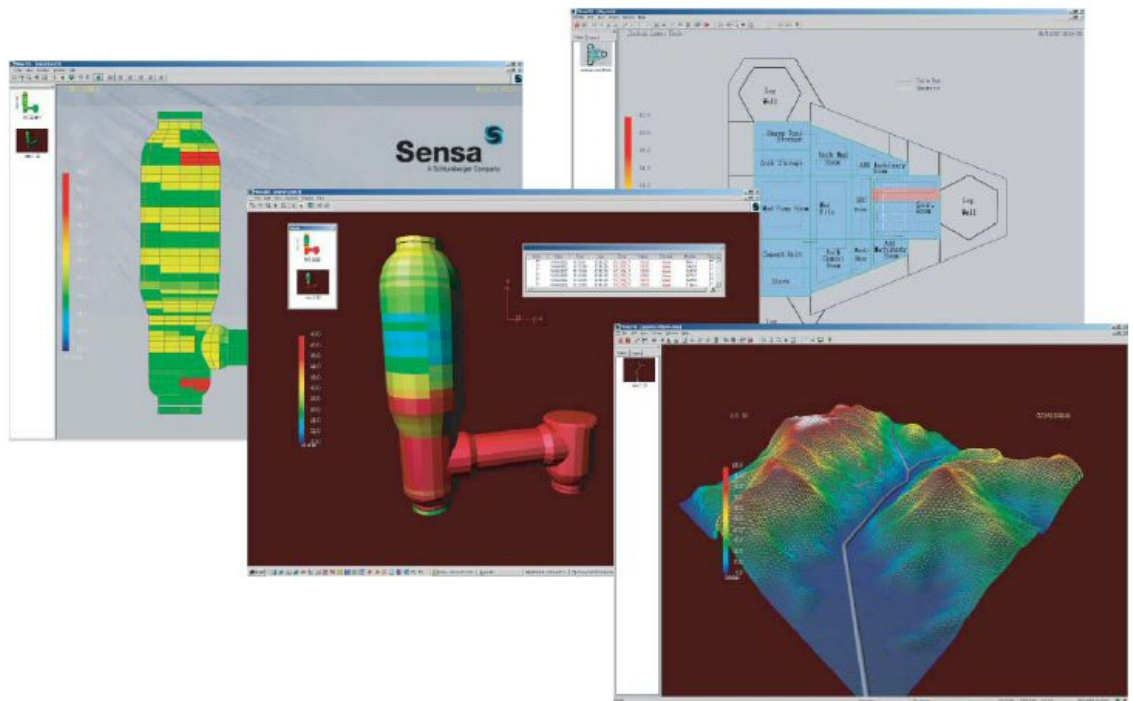
Acknowledge

Kuva 42. Zone Data-ohjelmalle asetettujen hälytysarvojen esitysikkuna [9]

6.2 Data2Wiev-mallinnusohjelma

Sensa Solutionin Data2Wiev-mallinnusohjelma on kehitetty toimimaan saumattomasti DTS-mittauksen (ks. kohta 4.3) kanssa. Ohjelmassa on mahdollista piirittää kaikkien eri Zone Datassa määritettyjen alueiden (Zone) mitta-arvot. Mitta-arvojen piirron avulla voidaan muodostaa kaksi- tai kolmiulotteinen piirros mitattavasta kohteesta. (kuva 43) [17.] Ku-

vien avulla voidaan mittauskohteita tarkkailla entistä realistisemmin ja reaaliajassa. Samalla havaitaan, missä kohden esimerkiksi kosteusvuoto tapahtuu.



Kuva 43. Sensa Solutionin Data2:View –ohjelmalla saatavia kaksi- ja kolmiulotteisia karttoja [17]

7 JATKOSUUNNITELMAT

7.1 Ensimmäinen vaihe

Optisen kuituanturin mahdollistamat mittaukset antavat erinomaiset näkymät tulevaisuutta ajatellen. Jos anturi todistaa toimintansa, se on yksi suurimmista laadunvalvontajärjestelmistä, joita rakennusteollisuuteen on lähiaikoina tulossa. Ennen tuotteen jokapäiväistä käyttöä on antureilla tehtävä tarkkoja mittaustestejä, jotta mittaustulokset antaisivat oikeat ja tarkat arvot.

Mittaustestit

Ennen anturin asentamista kiinteistöihin on se testattava huolellisesti laboratorio-olosuhteissa sekä testikohteissa. Laboratoriossa tutkittaisiin anturin mittauskykyä, eri mittausparametrien todenperäisyyttä sekä laitteiden yleistä toimivuutta sekä asennettavuutta. Näiden tutkimusten pohjalta voidaan vasta määrittää anturin asennuskorkeudet sekä mittaus-tarkkuudet. Vaikka tällä hetkellä on saatavilla osittaisia mittaustuloksia, ei niiden varaan voi tuotteen kaupallistamista jättää. Tuote on syytä testata omissa tiloissa rauhassa ja eri keinoin, jotta se voidaan asentaa järkevästi tuotteen tilaajan määrittelemiin mittauskohteisiin. Anturikaapelia on turha asentaa useita kilometrejä rakennukseen, jos sen toiminta ei lopulta täytä odotusarvoja.

Laboratoriotesteistä voidaan esittää seuraavat testauskohteet:

- toiminta käytännössä
- mittausarvot ja niiden paikkansapitävyys
- eri mittausparametrien selventäminen
- mittaustulosten käsittely
- asennus käytännössä.

Näiden edellä mainittujen asioiden selventyessä voidaan mitta-anturia suunnitella testattavaksi oikeissa rakennuskohteissa

Mittalaitteelle on tehtävä myös omia testejä, joissa tarkastelun kohteina ovat laitteen muuttavuus eri tilanteisiin sopivaksi, eri anturien asentaminen samaan mittalaitteeseen sekä mittalaitteen mittauksen kalibroimiset, jotta ne soveltuvat erilaisiin ympäristöihin. Mittalaitteesta on kehitettävä toimiva kokonaisuus, joka on helppo muokata eri tilanteisiin sopivaksi. Muokkaus voi vaatia asiantuntijajaritysten käyttöä, mutta tärkeintä on saada valmiiksi hyvä mittalaite, johon voi liittää useita eri anturiverkkoja.

Ensimmäinen vaihe tulisi olemaan kestoltaan noin puoli vuotta. Tuossa ajassa mittalaitteistojen puutteet ja kehitysnäkymät tulisi olla selvillä. Anturikaapeleiden asennus kestäisi laboratorioissa pari kuukautta, jonka jälkeen niitä olisi syytä päästä testaamaan ja tutkimaan konkreettisisa rakennuskohteissa. Tämän ansiosta ensimmäinen ja toinen vaihe tulisi limit-tää lopusta yhteen, jotta testaus voidaan suorittaa jouhevasti.

7.2 Toinen vaihe

Testaus oikeissa kohteissa

Laboratoriotestien osoittaessa kuituoptysen mittausanturin toimivuuden käytännössä voidaan mittaamista lähteä toteuttamaan oikeaan testauskohteeseen eli rakennettavaan kiinteistöön. Tuolloin mittalaitteen on oltava toimintakuntoinen, jotta testaus voidaan aloittaa välittömästi. Itse rakennuskohteessa seurattavia asioita ovat:

- mittalaitteen soveltuvuus
- mittaustulosten käsittely kohteissa
- asennussyvytydet ja -kohdat.

Ensimmäisissä kohteissa pääasialliseksi toiminnaksi asetetaan tietyt kriteerit, jotka on saavutettava. Mittalaitteen antamat tarkat arvot voivat sysätä hanketta vauhtiin, jos valmistelut ovat onnistuneet sitä ennen hyvin. Kuitenkin mittalaitteen toimivuus on alussa heikonpuoleinen johtuen vähäisistä mittaustuloksista ja kokemuksista. Tämä ei kuitenkaan onneksi estä kehittämästä laitetta eteenpäin. Tarkoituksena onkin saada järjestelmä toimimaan luotettavasti parin vuoden sisällä. Tämä edellyttää jatkuvaa kehitystyötä ja suunnitelmallisuutta.

7.3 Tuotekehitys

Mittausjärjestelmää on kehitettävä heti alkuun suurin harppauksin. Mittauslaitteisto on saatava yhteensopivaksi usean eri optisen mittausverkon kanssa, jotta mittalaitteella voidaan mitata mahdollisimman paljon, jolloin sen hyötysuhde kasvaa. Tätä varten mittalaitteeseen on kehitettävä oma porttijärjestelmänsä, jonka avulla kuitujen kytkennät onnistuvat saumattomasti. Samalla on muokattava mittalaitteen ohjelmistoa, jotta se kykenee mittaamaan suuria määriä mittaverkkoja.

Tällä hetkellä mittaustuloksia voidaan lukea ainoastaan tietokoneen näytöltä, joka on jonkinlaisessa verkkoyhteydessä mittalaitteeseen. Tämä on osittain hidastava tekijä, jos ajatellaan, että kannettavan on oltava laitteiston lähistöllä. Siksi on syytä alkaa kehittää verkkojärjestelmää, jossa mittalaitteistot ovat omana kokonaisuutena jossain keskitetyssä pisteessä. Tämä etäpiste asennettaisiin toimimaan selainpohjaisesti, jolloin salasanojen avulla voidaan esimerkiksi toimistossa tarkastaa tietyn kohteen mittaustoiminnot ja säätää niitä tarpeen mukaan. Tällä tavoin seuranta helpottuu ja samalla monelle eri asianomaiselle annetaan mahdollisuus tarkastella mittaustoimenpiteitä.

Tätä toimintoa voi myöhemmin jatkokehittää esimerkiksi siten, että mittaustuloksia haluavalla asiantuntijalla on oma kämmentietokone, josta hän voi tarkastaa mittaustulosten tilanteet langattomasti esimerkiksi työmaalla tai kokouksessa, jossa tietoa tarvitaan juuri sillä hetkellä.

Tuotekehitys ei tunne rajoja tämän mittausjärjestelmän osalta, mutta on syytä muistaa, että laitteisto antureineen on saatava toimimaan tarpeiden mukaan, ennen kuin on syytä alkaa kehittää uusia oheislaitteita järjestelmälle. Kun mittausjärjestelmä toimii käytännössä kuin tässäkin työssä on esitetty, on tällöin syytä kehittää uusia helpottavia laitteistoja, jotta järjestelmästä saadaan mahdollisimman toimiva ja kokonaisvaltainen kokonaisuus.

8 YHTEENVETO

Optisten antureiden arveltiin olevan matkansa päässä 2000-luvun alussa, koska niiden ominaisuudet oletettiin olevan jo loppuun käytetty. Näin ei kuitenkaan tällä hetkellä ole. Kuitu-antureiden markkinat ovat vasta kasvamaisillaan uusien ideoiden ja käyttökohteiden ansiosta, joissa käytetään hyväksi kuitujen erikoisominaisuuksia. Näiden käyttökohteiden ansiosta mittalaitteiden kehitys on koko ajan kasvanut ja mittaustarkkuus on samoin kasvanut. Nyt onkin vain ajan kysymys, jotta optisen kuidun mahdollistamat palvelut saadaan hyödynnettyä niin hyvin kuin on vain mahdollista.

Työssäni olen saanut hyvin hankittua kansainvälistä tutkimustietoa optisten mitta-antureiden käytöstä ympäri maailmaa. Tämä onkin ollut erinomaista lähdemateriaalia työssäni. Huomion arvoista työssäni on se, että itse virallista kirjallisuutta tutkimuksieni tueksi ei ole tiedossa. Ulkomailta on saatavilla perus pohjateoksia, mutta niiden hankinta Suomeen on hankalaa.

Insinöörityöni lopputulos jäi hieman vajaaksi tutkimusten osalta, koska mittalaitteen saaminen Kajaaniin oli erittäin hankalaa sen korkeiden kustannusten sekä mittalaittevalmistajien vähyyden takia. Jos laite olisi saatu käyttöömmee jo tammikuussa 2007, olisivat mittaus tulokset olleet tärkeä osa tätä työtä. Niiden avulla olisi voitu ilmaista järjestelmän toimivuus käytännössä. Tämä olisi ollut myös tukena laitteen jatkotutkimusten etenemiselle. Olenkin pohtinut optisen anturijärjestelmän mahdollisia käyttökohteita tarkasti, mutta silti erittäin avoimesti. Tästä syystä osa tässä työssä esitetyistä ratkaisumalleista ei välttämättä toimi käytännössä samoin kuin teoriassa. Tämän tähden on erittäin tärkeää testata järjestelmää useissa eri kohteissa ja paikoissa. Tällä tavoin saadaan aikaan oikea asennustapa sekä ne mittaus tulokset, joita optisilla kuidulla on mahdollista mitata.

Tällä hetkellä optisten antureiden kirjallisuudessa esitetyt ominaisuudet ja toiminnot antavat erinomaiset lähtötiedot mittausjärjestelmien toteutukseen. Pohjatietojen avulla voidaan määrittää alustavasti käyttökohteita ja niissä mitattavia parametreja. Tämän seurauksena on syytä tehdä jatkotutkimuksia, jotta voidaan selvittää oikeat asennustavat sekä käyttökohteet. Ilman tarkkoja tutkimuksia ei antureita kannata lähteä asentamaan mittalaitteiden korkeiden hankintakustannuksien takia.

Tutkimukset onkin syytä aloittaa testaamalla kuituja eri asennussyvyyksissä ja verraten näitä samalla muihin rakennusosalalla käytettäviin mitta-antureihin. Tällöin saadaan arvokasta mitta-

tietoa, jonka avulla mittaustulokset saavat vahvan pohjan oikeellisuudestaan. Vasta testien jälkeen on optiset kuidut järkevää viedä rakennuksiin erinäisiin testausolosuhteisiin. Tuolloin kuiduilta ei voi välittömästi odottaa tarkkaa toimivuutta vaan kaikki viat sekä uudet ideat on syytä testata todellisuudessa ennen tuotteen lopullista kaupallistamista. Tällä tavoin saavutetaan ehdoton tuotteiden toimivuus käytännön tilanteissa.

Täydellisten testausten perusteella voidaan tuotteesta saada hyvä mittajärjestelmä rakennuksiin, mutta pahimmassa tapauksessa järjestelmä ei saavuta sille asetettuja odotusarvoja. Tässä tapauksessa syynä voivat olla:

- mittalaitteen soveltumattomuus rakenteiden mittaukseen,
- mittalaitteen ohjelmistojen kehityksen vaikeudet,
- kuitukaapeleiden asennusvaikeudet sekä soveltuvuus,
- mittaustulosten paikkaansa pitämättömyys,
- tai muu laitteistosta tai kuidusta johtuva syy.

Tällaiset ongelmat ovat kuitenkin mahdollisesti ratkaistavissa ja ne tulevat esiin vasta pidempien testausten jälkeen.

LÄHTEET

- 1 Nilsson-Gistvik Stefan. Optical fiber theory for communication networks. Gistvik Communications 2004
- 2 Encyclopedia of laser physics and technology.
URL: <http://www.rp-photonics.com/index.html> (Luettu 5.2.2007)
- 3 Oulun Yliopisto. Brilloun-sironta ja sen sovellutukset.
URL:
<http://http://www.electronics oulu.fi/opetus/OE/brillouin%20ja%20raman.pdf>
(Luettu 12.1.2007)
- 4 Rice Trevor, Duncan Roger, Gifford Dawn, Childers Brooks. Fiber optic distributet strain, acoustic emission and moisture detection sensors for health maintenance. Luna Innovations. 2005
- 5 Yeo T L, Eckstein T, MacKinley B, Boswell L F, Sun T, Grattan K T V. Fibre-optic sensor for the monitoring of moisture ingress and porosity of concrete. The International society for optical engineering 2005. 2005SPIE.5855..491
- 6 Yeo T L, Cox M A C, Boswell L F, Sun T, Grattan K T V. Monitoring ingress of moisture in structural concrete using a novel optical-based sensor approach. URL: www.iop.org/EJ/article/1742-6596/45/1/025/jpconf6_45_025.pdf (Luettu 1.2.2007)

- 7 Sakaguchi Keiichi, Matsushima Nuobuo. Temperature logging by the distributed temperature sensing technique during injection tests. Proceedings world geothermal congress 2000. Tohoku, Japan. URL: www.geothermie.de/egec-geothernet/prof/0400.PDF (Luettu 6.2.2007)
- 8 Sensa Solutions. What is Distributed Temperature Sensing? Sensa a Schlumberger company 2007 URL: <http://www.sensa.org/userDocs/IS-TEC-Iss04-BASE.pdf> (Luettu 9.2.2007)
- 9 Sensa Solutions. DTS data types and output methods. Sensa a Schlumberger company 2007 URL: http://www.sensa.org/userDocs/IS-DTOM-Iss02_web.pdf (Luettu 9.2.2007)
- 10 Englund Marja, Ipatti Ari. Valokaapeli seuraa betonirakenteen kuntoa koko elinkaaren ajan. Betoni-lehti 2/2004 URL: http://www.betoni.com/betoni_import/BET0402_s44_47.pdf (Luettu 30.12.2007)
- 11 Romppainen Pentti. Optisen mittaustekniikan perusteet. Kuituoptiset anturit. Luentomateriaali. 12.11.2006
- 12 Reinikoski Hannu, Huotari Markku. Optinen kosteudenvälvonta. Esitys YIT rakennustekniikalle Jyväskylässä 20.12.2006. Reiniko Oy.
- 13 RT –kortisto. RT 14–10675. Rakennustietosäätiö RTS. Rakennustieto Oy 2004.

